



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS DE MEDIDAS DE GESTIÓN DE TRÁNSITO QUE AFECTEN LA
DEMANDA DE TRÁFICO USANDO TRIPS**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA DE TRANSPORTE**

NATALIA CRISTINA DURÁN AMOROCHO

**PROFESOR GUIA:
RODRIGO FERNÁNDEZ AGUILERA**

**MIEMBROS DE LA COMISION:
JUAN ENRIQUE COEYMANS AVARIA
JAIME GIBSON ALDUNATE
MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ
EDUARDO VALENZUELA FRERAUT**

**SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2009**

RESUMEN

Las medidas de gestión de la demanda de tráfico están diseñadas para regular el uso de los automóviles e incentivar modos de transporte alternativos (transporte público, bicicletas, caminata). Es difícil evaluar el impacto de estas medidas utilizando modelos estratégicos, ya que consideran variables de tráfico de manera agregada (curvas flujo-velocidad) e ignoran variaciones de capacidad en intersecciones en períodos cortos (v. g., dentro del ciclo de un semáforo). Tampoco son apropiados modelos operacionales, como TRANSYT, SATURN o GETRAM, ya que algunas de estas medidas pueden incidir en la asignación de tráfico, pero también sobre otras etapas del modelo de demanda. Esta tesis muestra la aplicación de un modelo más flexible (TRIPS: TRansport Improvement Planning System) que permite modelar las cuatro etapas del modelo clásico de transporte y al mismo tiempo representar una red en detalle (semáforos, rotondas, señales de prioridad, pistas sólo bus).

Para esta investigación se buscaron modelos de demanda calibrados para una ciudad de tamaño medio, utilizándose los reportados para la ciudad de Valdivia en 1998 por una empresa consultora. Con la información de la red y los modelos de demanda se implementó TRIPS, usando el costo generalizado de viaje para alimentar las etapas de partición modal y distribución. Dadas las limitaciones encontradas en el software para el tratamiento de las paradas del transporte público, se calibraron relaciones entre el flujo y la velocidad comercial de buses calibradas con una base de datos de la ciudad de Concepción. Todo lo anterior permitió una razonable representación de la red y comportamiento de los usuarios para probar diversas medidas de gestión de tránsito. Entre estas se probaron la implantación de calles exclusivas para el transporte público, la reversibilidad de vías para el transporte privado y la tarificación por congestión en el centro del área de estudio.

Los resultados obtenidos están relacionados con la topología y características de la red, con los modelos de demanda, y con los lugares donde se implementaron las medidas. En este sentido deben considerarse de manera relativa. Los resultados están en la línea de lo esperado y los más destacables son los siguientes. Las calles exclusivas para el transporte público producen cambios en la partición modal, pero no en la distribución de viajes. En la asignación de tráfico hay cambios no sólo en las vías adyacentes a las vías exclusivas, sino en un área bastante mayor, incluyendo el centro de la ciudad. La reversibilidad no tuvo ningún impacto práctico en la demanda, observándose que su impacto en la asignación sólo afecta la vialidad inmediata. La tarificación en el centro produjo una reasignación en un área bastante mayor a la intervenida; no sólo en las calles cercanas y de acceso. Además, hizo cambiar la partición modal, no sólo de los viajes con origen o destino el centro, sino que la de toda la ciudad.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Objetivos	2
	1.1.1 Objetivos específicos.....	2
1.2	Estructura.....	2
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Gestión de la demanda de tráfico	3
2.2	Modelos de transporte	10
	2.2.1 GETRAM.....	10
	2.2.2 TRANSYT.....	11
	2.2.3 SATURN.....	11
	2.2.4 ESTRAUS	12
	2.2.5 EMME/2.....	12
	2.2.6 TRIPS.....	14
	2.2.7 Elección del modelo a usar	15
3	METODOLOGÍA	17
3.1	La relación entre las etapas del modelo clásico de transporte.....	18
3.2	Análisis de la herramienta	19
	3.2.1 Modelos internos	20
	3.2.2 Curvas flujo-velocidad para el transporte público.....	21
	3.2.3 Propuesta de curvas flujo-velocidad para el transporte público	21
3.3	Construcción del modelo.....	24
4	DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN USADA.....	32
4.1	Red de modelación.....	33
4.2	Modelos de demanda	36
	4.2.1 Modelos de generación y atracción de viajes.....	36
	4.2.2 Modelo de distribución.....	40
	4.2.3 Modelo de partición modal	42
4.3	Modelo de asignación	44
4.4	Situación base	45
5	EXPERIMENTOS.....	49
5.1	Prioridad al transporte público	49
5.2	Reversibilidad de vías	51
5.3	Tarificación vial en una zona.....	54
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	57
6.1	Prioridad al transporte público	57
	6.1.1 Análisis sin variación en la generación.....	57
	a. Distribución.....	57
	b. Partición modal.....	58
	c. Asignación	60
	d. Tiempo de viaje e índice de rendimiento	63
	6.1.2 Análisis con variación en la generación.....	64
	a. Distribución.....	64
	b. Partición modal.....	65
	c. Asignación	66
	d. Tiempo de viaje e índice de rendimiento	72
6.2	Reversibilidad de vías	75
	6.2.1 Análisis sin variación en los vectores de atracción y generación de viajes	75

a.	Distribución	75
b.	Partición modal	76
c.	Asignación	76
d.	Tiempo de viaje e índice de rendimiento	79
6.2.2	Análisis con escenarios de vectores de atracción y generación de viajes	81
a.	Distribución	81
b.	Partición modal	83
c.	Asignación	84
d.	Tiempo de viaje e índice de rendimiento	88
6.3	Tarificación vial en una zona	96
a.	Distribución	96
b.	Partición modal	97
c.	Asignación	99
d.	Tiempo de viaje e índice de rendimiento	104
e.	Comparación con lo reportado en la literatura	108
7	CONCLUSIÓN	109
7.1	Síntesis de resultados.....	109
	Prioridad al transporte público	109
	Reversibilidad de vías	109
	Tarificación vial en una zona	110
7.2	Respuesta a los objetivos.....	110
7.3	Investigaciones futuras.....	111
8	BIBLIOGRAFÍA	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Relación entre las etapas del modelo clásico de transporte.....	19
Figura 2.	Disposición general de grupos (pantalla de TRIPS).....	25
Figura 3.	Creación de la red (pantalla de TRIPS).....	26
Figura 4.	Definición de intersecciones (pantalla de TRIPS).....	27
Figura 5.	Definición de líneas de transporte público (pantalla de TRIPS).....	28
Figura 6.	Subprograma de distribución (pantalla de TRIPS).....	29
Figura 7.	Programación de subprograma de partición modal (pantalla de TRIPS).....	30
Figura 8.	Datos de control del subprograma de asignación (pantalla de TRIPS).....	31
Figura 9.	Red de Modelación.....	33
Figura 10.	Características de la red de modelación.....	34
Figura 11.	Líneas de transporte público.....	35
Figura 12.	Nombres de algunas calles relevantes.....	35
Figura 13.	Viajes generados y atraídos en cada zona.....	45
Figura 14.	Partición modal, según área de análisis.....	46
Figura 15.	Asignación de flujos a la red.....	47
Figura 16.	Grados de saturación de la red.....	47
Figura 17.	Vías elegidas para adoptar medidas de prioridad al transporte público.....	50
Figura 18.	Vía elegida para probar medidas de reversibilidad.....	52
Figura 19.	Macrozonas.....	53
Figura 20.	Zona tarifcada.....	55
Figura 21.	Ubicación de zonas con mayor variación en la distribución de los viajes.....	58
Figura 22.	Partición modal, todos los modos, situación base y con vías exclusivas, viajes en toda la ciudad y zona centro.....	59
Figura 23.	Partición modal, modos agrupados, situación base y con vías exclusivas, viajes en toda la ciudad y zona centro.....	59
Figura 24.	Cambios en la asignación de flujo a la red.....	60
Figura 25.	Grados de saturación superiores a 30% en la situación base.....	61
Figura 26.	Grados de saturación superiores a 30% con vías exclusivas.....	62
Figura 27.	Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino en cada escenario de generación de viajes.....	65
Figura 28.	Diferencias en la partición modal agrupada, para los escenarios de generación de viajes.....	66
Figura 29.	Cambios en la asignación de flujo a la red para los distintos escenarios.....	67
Figura 30.	Cambios en la asignación de flujo a la red para los distintos escenarios.....	68
Figura 31.	Grados de saturación superiores a 30%, situación base y con vías exclusivas, generación al 90%.....	69
Figura 32.	Grados de saturación superiores a 30%, situación base y con vías exclusivas, generación al 110%.....	70
Figura 33.	Grados de saturación superiores a 30%, situación base y con vías exclusivas, generación al 140%.....	71
Figura 34.	Variaciones en los tiempo de viaje de las líneas de transporte público.....	72
Figura 35.	Tiempo de viaje en situación base y vía exclusiva, según escenario de generación, para transporte público.....	73
Figura 36.	Tiempo de viaje en situación base y vía exclusiva, según escenario de generación, para transporte privados.....	73
Figura 37.	Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero, según escenario de generación de viajes.....	74
Figura 38.	Índice de rendimiento total, según escenario de generación de viajes, en \$/hora.....	75
Figura 39.	Partición modal, modos agrupados, situación base y con vía reversible, viajes en toda la ciudad y zona centro.....	76
Figura 40.	Cambios en la asignación de flujo a la red.....	77
Figura 41.	Grados de saturación superiores a 30% en la situación base.....	78
Figura 42.	Grados de saturación superiores a 30% en la situación base.....	79

Figura 43.	Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino, para los escenarios variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante.....	82
Figura 44.	Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino, para los escenarios variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante.....	82
Figura 45.	Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino, para los escenarios variación en la concentración de la atracción y generación de viajes.....	83
Figura 46.	Diferencias en la partición modal agrupada, para los escenarios variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante	83
Figura 47.	Diferencias en la partición modal agrupada, para los escenarios variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante	84
Figura 48.	Diferencias en la partición modal agrupada, para los escenarios variación en la concentración de la atracción y generación de viajes	84
Figura 49.	Cambios en la asignación de flujo a la red para los escenarios con mayores cambios	85
Figura 50.	Cambios en la asignación de flujo a la red para los escenarios con mayores cambios	86
Figura 51.	Grados de saturación superiores a 30% para el escenario de atracción al centro en 10% y generación sin modificar.....	87
Figura 52.	Grados de saturación superiores a 30% para el escenario de atracción al centro en 10% y generación sin modificar.....	88
Figura 53.	Reruteos transporte público.....	89
Figura 54.	Tiempo de viaje promedio en transporte público, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante.....	89
Figura 55.	Tiempo de viaje promedio en transporte público, para los escenarios con variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante.....	90
Figura 56.	Tiempo de viaje promedio en transporte público, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción y generación de viajes.....	90
Figura 57.	Tiempo de viaje promedio en transporte privado, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante.....	91
Figura 58.	Tiempo de viaje promedio en transporte privado, para los escenarios con variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante.....	91
Figura 59.	Tiempo de viaje promedio en transporte privado, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción y generación de viajes.....	92
Figura 60.	Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante	93
Figura 61.	Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero, para los escenarios con variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante	93
Figura 62.	Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción y generación de viajes	94
Figura 63.	Índice de rendimiento total (\$/h), para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante.....	94
Figura 64.	Diferencias del índice de rendimiento total, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante	95
Figura 65.	Diferencias del índice de rendimiento total, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante	95
Figura 66.	Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino en cada escenario tarifario	96
Figura 67.	Partición modal, para todos los escenarios, viajes en toda la ciudad.....	97
Figura 68.	Partición modal, para todos los escenarios, viajes hacia la zona centro	98
Figura 69.	Cambios en la asignación de flujo a la red entre la situación base y distintos escenarios	100
Figura 70.	Cambios en la asignación de flujo a la red entre la situación base y distintos escenarios	101
Figura 71.	Grados de saturación superiores a 30% en distintos escenarios	103
Figura 72.	Grados de saturación superiores a 30% en distintos escenarios	104
Figura 73.	Variaciones en los tiempo de viaje de las líneas de transporte público.....	105
Figura 74.	Tiempo de viaje promedio en transporte público y privado, en minutos	106
Figura 75.	Diferencias en la velocidad promedio en transporte público y privado	106
Figura 76.	Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero	107
Figura 77.	Diferencias del índice de rendimiento total	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ejemplos de medidas de gestión de demanda de tráfico	4
Tabla 2.	Matriz de beneficios por impactos en los viajes.....	5
Tabla 3.	Cambios en los viajes realizados en Londres entre 2002 y 2003.....	7
Tabla 4.	Características de los modelos por tipo.....	15
Tabla 5.	Resultados de la primera calibración, cálculo velocidad de recorrido	22
Tabla 6.	Resultados de la segunda calibración, cálculo velocidad de recorrido.....	23
Tabla 7.	Resultados de la calibración de la velocidad comercial.....	23
Tabla 8.	Calibración relación tiempo detenido vs pasajeros que suben y bajan por km.....	24
Tabla 9.	Calibración relación frecuencia de detenciones vs pasajeros que suben y bajan por km	24
Tabla 10.	Tasas de generación de viajes (viajes/hogar) Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Trabajo	38
Tabla 11.	Ajuste del modelo de generación de viajes zonales por categoría de usuario Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Trabajo	38
Tabla 12.	Tasas de generación de viajes (viajes/hogar) Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Estudio	38
Tabla 13.	Ajuste del modelo de generación de viajes zonales por categoría de usuario Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Estudio.....	38
Tabla 14.	Modelo de Atracción de viajes zonales totales Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Trabajo	39
Tabla 15.	Modelo de Atracción de viajes zonales totales Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Estudio	40
Tabla 16.	Parámetro β^n Calibrados por Propósito y Categoría, periodo punta mañana.....	42
Tabla 17.	Modelos de Partición Modal del período Punta Mañana	43
Tabla 18.	Valores Subjetivos del Tiempo de Viaje del período Punta Mañana	44
Tabla 19.	Variables de servicio promedio de la situación base	48
Tabla 20.	Porcentaje propuesto por macrozona en los escenarios.....	54
Tabla 21.	Índices de rendimiento por modo y pasajero	64
Tabla 22.	Índices de rendimiento por modo y pasajero	80
Tabla 23.	Elasticidades y valores subjetivos del tiempo para distintas ciudades	98

1 INTRODUCCIÓN

Las medidas de gestión de tránsito se pueden clasificar en dos categorías:

- gestión de la oferta, que busca maximizar la capacidad vial de la red,
- y gestión de la demanda, cuyo objetivo consiste en reducir los flujos vehiculares sobre la red.

Según Wallace et al. (1999) las medidas de gestión de la demanda están diseñadas para regular el deseo de los viajeros por usar automóviles e incentivarlos a usar modos de transporte alternativos (transporte público, bicicletas, caminata). Esto se refleja en la disminución del grado de saturación (razón entre el flujo y la capacidad) de los diferentes dispositivos viales, producto de la disminución del flujo de vehículos a igual capacidad vial, y, a través de éste, en los impactos urbanos derivados del tráfico como: congestión (colas, demora, detenciones), polución, ruido, riesgo, segregación, intimidación, intrusión visual, etc. (Ferguson, 1991).

Entre las medidas que se mencionan en la literatura como potencialmente atractivas para reducir los flujos vehiculares están:

- las prioridades al transporte público (p. ej. vías exclusivas para buses),
- la eliminación de estacionamientos en áreas céntricas,
- facilidades a modos no motorizados (calles peatonales y ciclo vías)
- y la reducción de la saturación en un área a partir de modificaciones en la programación de las redes de semáforos.

Los efectos de estas medidas pueden ser muy variados, dependiendo del conjunto que se elija. Se pueden lograr cambios en la ruta elegida, en la combinación de modos a usar, en los horarios en que se realizan los viajes o incluso en la decisión de realizarlos o no (IHT, 1997; Victoria Transport Policy Institute).

Aplicar modelos de carácter estratégico, se han usado con este fin, dificulta la evaluación de los impactos de este tipo de medidas, ya que éstos consideran algunas variables de tráfico de manera agregada como curvas flujo-velocidad e ignoran otras como la variación en la capacidad de una intersección durante los ciclos del semáforo.

Modelos estratégicos como: ESTRAUS o EMME/2 son insensibles a aspectos fundamentales de gestión de tráfico (e. ej., considerar la programación de semáforos). Por ello, no logran modelar la variación en el patrón de flujos y la capacidad; en consecuencia, no obtienen una buena estimación del grado de saturación y sus impactos asociados.

Modelos operacionales como: TRANSYT, SATURN o GETRAM tampoco son apropiados, ya que algunas medidas de gestión de tránsito pueden incidir sobre la asignación, la partición modal, e inclusive la distribución o generación de viajes (Montero et al., 1998; Siegel y de Grange, 2001).

Sin embargo, una herramienta más flexible como TRIPS (TRansport Improvement Planning System) (CITILABS, 2002), que permite modelar las cuatro etapas del modelo clásico de transporte y al mismo tiempo, crear una red con detalle (e. ej. tipos de intersecciones, programación de semáforos); tiene las características necesarias para poder hacer este tipo de análisis. Según la revisión bibliográfica TRIPS no ha sido probado con el objetivo de evaluar medidas de gestión de tráfico, en Chile ni Latinoamérica.

A partir de lo anterior, surgen tres preguntas a las que se les quiere buscar respuesta en esta tesis:

- ¿Qué medidas de gestión de tránsito impactan efectivamente en la demanda de tráfico?
- ¿En qué proporción lo hacen en un medio como el chileno o latinoamericano?
- ¿Qué tan apropiada es una herramienta como TRIPS para captar estos cambios?

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es medir cuantitativamente los impactos de determinadas medidas de gestión de tránsito sobre la demanda de tráfico (flujos de vehículos), utilizando como herramienta un modelo apropiado de carácter táctico (TRIPS).

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Revisar diversas medidas de gestión de tránsito que potencialmente afecten la demanda de tráfico y sus impactos reportados en la literatura internacional.
- b) Usar TRIPS para probar las distintas medidas de gestión, estimar dichos impactos e implementarlo en un área de tamaño apropiado (p. ej. una ciudad de tamaño medio).
- c) Definir distintos esquemas de gestión de tránsito en el área de análisis, comparar y discutir los resultados con los efectos observados o esperados, según la teoría y literatura.

1.2 ESTRUCTURA

Este primer capítulo expone la motivación y relevancia de estudiar este tema, luego se plantean los objetivos y por último, se presenta la estructura del documento.

En el segundo capítulo se encuentra la revisión bibliográfica, donde hace una explicación detalla de lo que son las medidas de gestión de demanda de tráfico, se realiza un análisis crítico de los modelos de transporte y se analizan los modelos internos de TRIPS.

A continuación, se presenta la metodología, donde se describen los pasos para desarrollar el modelo en la herramienta, se indica una propuesta de medidas de gestión de demanda de tráfico. En el cuarto capítulo se presenta la descripción de la información usada, dando los detalles de la red y los modelos de demanda y asignación que se utilizaron al construir el modelo.

Luego se explican detalladamente los experimentos, revisando cuáles son los elegidos, en qué parte de la red se consideran y la forma en que finalmente se modelan. En el sexto capítulo se desarrolla el análisis de resultados, donde adicionalmente a su presentación, se hace un análisis crítico y se determina si coinciden con lo esperado. Por último, se presentan las conclusiones de esta tesis.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El objetivo de la gestión de demanda de tráfico es mejorar el uso de los recursos de transporte existentes. Esto se hace a través de medidas orientadas a modificar el patrón de los viajes que se realizan o el hecho de que éstos no se efectúen.

La consideración de la gestión de la demanda como una alternativa legítima al sistema de transporte ha sido dificultosa, porque los métodos para cuantificar los costos y beneficios de estas estrategias, comparado con los correspondientes efectos de las nuevas construcciones, no han sido bien desarrollados (Wallace et al. 1999).

Los impactos de estas medidas de gestión de la demanda de tráfico pueden afectar una o más de las 4 etapas del modelo tradicional de transporte. El problema es que muchos de las herramientas de transporte—actualmente en uso—son muy detallados y sólo consideran una de las etapas, o son muy generales y no logran incluir las variables locales afectadas.

Para cuantificar los impactos de las medidas de gestión de la demanda de tráfico es necesario conocer estas medidas, los cambios y beneficios esperados, y también distinguir cabalmente los modelos existentes.

Este capítulo se divide en:

- la revisión de la gestión de la demanda de tráfico,
- la presentación de GETRAM, TRANSYT, SATURN, ESTRAUS, EMME/2 y TRIPS,
- el análisis de los modelos internos de la herramienta elegida para determinar sus debilidades y proponer formas de superarlas.

2.1 GESTIÓN DE LA DEMANDA DE TRÁFICO

Es el arte de modificar lenta y gradualmente el comportamiento individual de los viajeros, en vez de estar expandiendo la capacidad vial cada vez que se observa o se espera un aumento en la congestión (Ferguson, 1991).

Esto se hace a través de una gran variedad de medidas o paquetes de éstas que tienen diferentes tipos de impactos en el sistema de transporte. Éstas pueden intervenir y variar los horarios, los destinos, las rutas o modos de los viajes.

Por ejemplo, por medio de estrategias que mejoren el transporte público u otorgando facilidades a peatones y ciclistas, y de esta forma, incentivar cambios modales.

Entre ciertas medidas que parecen atractivas se hallan:

- las prioridades al transporte público (p. ej. vías exclusivas o mejoras tecnológicas a los buses),
- las facilidades a peatones y ciclistas,
- el control de estacionamientos en áreas céntricas,
- la tarificación vial,
- *gating* (control de los flujos y/o sus impactos mediante variaciones en la programación de semáforos).

Cada medida tiene objetivos específicos e impactos diferentes. Por ejemplo: las prioridades al transporte público se orientan a cambios modales, mientras que el *gating* puede intervenir en los horarios y asignación de los viajes; con la tarificación vial modificar el destino o partición modal de algunos de los viajes o la asignación a la red dependiendo del tipo de tarificación que se considere (rutas o zonas).

A continuación, se presentan algunos ejemplos de medidas, con los mecanismos que se usan para su implantación y los cambios que resultan en los viajes.

Tabla 1. Ejemplos de medidas de gestión de demanda de tráfico

Medidas de gestión de demanda de tráfico	Mecanismo	Cambios en viajes
Aquietamiento del tráfico (<i>traffic calming</i>)	Gestión de las vías con medidas de rediseño.	Reduce la velocidad de los vehículos, desincentiva uso de esas vías y mejora las condiciones de los peatones.
Tiempo flexible (trabajo)	Incentivos a empresas o industria que cambian los horarios o permiten trabajo desde la casa.	Cambia el horario de los viajes (si es que se realizan)
Cobro por congestión vial	Cobro directo a los usuarios al entrar a un área o vía congestionada en vehículo privado.	Cambia el horario de los viajes, reduce los flujos en determinadas vías y/o áreas.
Mejoras al transporte público	Mejorar las condiciones de infraestructura y operación del transporte público.	Cambio de modo, aumenta el uso de transporte público
Promoción de compartir el viaje	Provisión de pistas rápidas para vehículos con alta ocupación, o permiso de entrar a áreas restringidas.	Aumenta la ocupación de los vehículos, disminuye los flujos vehiculares
Mejoras a peatones y ciclistas	Mejoras en las condiciones de viaje de estos modos.	Cambios de modo, aumentan la caminata y el uso de bicicletas.
Promoción de compartir el auto	Permitir y crear incentivos para la compra compartida del auto.	Reduce la tenencia de autos y los flujos vehiculares.
Crecimiento urbano inteligente, nuevo urbanismo	Proveer servicios (educación, comercio, etc.) dentro o cerca de las áreas residenciales.	Cambios de modo, reducen la tenencia de autos y la longitud de los viajes.

Diferentes tipos de estrategias de gestión de demanda de tráfico causan diferentes tipos de cambios en los viajes

Fuente: Basado en <http://www.vtpi.org/tm/tm14.htm> (Victoria Transport Policy Institute) y elaboración propia

Las medidas de gestión de la demanda de tráfico alteran los patrones de viajes y esto produce variaciones en distintos niveles del sistema de transporte. Por ejemplo, si una medida está orientada a reducir la velocidad del tráfico es muy beneficiosa en términos de seguridad vial, pero no tiene un impacto positivo en la reducción de la congestión. Las medidas que se orientan en el cambio de horario del viaje resultan muy beneficiosas en la reducción de la congestión pero en los demás aspectos no influyen mucho. En cambio, aquellas que logran bajar la posesión de vehículos son muy beneficiosas en todos los aspectos planteados.

La siguiente matriz presenta los tipos de beneficios por impacto que se producen en los patrones de viajes. Algunos de éstos son:

- reducción de la congestión,
- ahorro en consumo de recursos (tiempo, combustible, etc.),
- mayor uso de las alternativas al transporte privado
- y mejoras en la calidad de vida.

Tabla 2. Matriz de beneficios por impactos en los viajes

Impactos Beneficios	Reducción en las velocidades de tráfico	Cambio en el periodo del viaje	Viajes cortos	Cambios en los modos	Reducción en los flujos vehiculares	Reducción en la tenencia de vehículos
Reducción de la congestión		3	2	2	3	3
Ahorros en estacionamientos				3	3	3
Ahorros por consumos de recursos			1	2	2	3
Uso de modos alternativos (más eficientes) al transporte privado		1		3	2	3
Seguridad vial	3		2	2	3	3
Protección del medioambiente	1		1	2	2	3
Uso del suelo eficiente	1		2	1	2	3
Calidad de vida	2		1	1	2	3

Rango desde 3 (muy beneficioso) a -3 (muy desbeneficioso).

Fuente: <http://www.vtpi.org/tdm/tdm14.htm>

La matriz plantea relaciones entre los impactos logrados en los viajes y sus beneficios. En muchos casos el impacto se define a partir de su principal beneficio esperado. Por ejemplo: mejorar la seguridad vial está completamente relacionado con una velocidad reducida, debido a que el conductor de un vehículo puede reaccionar mejor y los efectos de posibles accidentes son menos graves. Otro ejemplo, es que reducir los flujos vehiculares implica también reducir la congestión.

Sin embargo, no todas las relaciones aquí planteadas son correctas. Por ejemplo: en zonas y arcos donde se reducen los flujos vehiculares, se incrementan las velocidades, sobretodo, cuando la situación inicial es de congestión, lo cual no mejora la seguridad vial. Una relación no considerada en la matriz es que hacer los viajes más cortos o reducir la velocidad en zonas residenciales, tiende a mejorar las condiciones e incentivar el uso de modos alternativos al vehículo privado.

Es necesario analizar bien las relaciones ya planteadas dado que algunas parecen contradictorias y sin embargo son coherentes. Por ejemplo en la matriz no se establece ninguna relación entre la reducción de la velocidad de tráfico (impacto) y la reducción de la congestión (beneficio). Se esperaría una relación desfavorable si se piensa en reducir la velocidad en una calle congestionada. Pero esta relación no es tal, porque las medidas de reducción de las velocidades (medidas de *traffic calming*) se deben implementar solamente en zonas de baja congestión y de jerarquía local.

En el contexto internacional, trabajos como los de Cairns et al. (1998) y Cairns et al. (2002) dan ejemplos de más de 60 casos donde se implementaron medidas de gestión de tránsito, enfocadas principalmente a cerrar parte de la red vial para uso exclusivo de algunos usuarios como peatones, ciclistas o transporte público.

Los resultados, en gran parte de estos casos —al menos 50— muestran que los niveles de flujo en el área alrededor disminuyen y no aumentan como se predijo. En estos casos se logró que las personas efectivamente modifiquen sus decisiones y cambien el modo, el destino e incluso no realicen el viaje.

Generalmente, las medidas de gestión no se implementan aisladas, sino como un conjunto. En el caso de priorizar el transporte público, actualmente, la tendencia en Latinoamérica es no sólo aplicar medidas de gestión de tránsito; sino acompañarlas de profundas alteraciones en el funcionamiento de las empresas, el sistema de pago y la tecnología de los buses. Algunos ejemplos son: Transmilenio en Bogotá, la Ecovía en Quito, Transmetro en Guatemala y Transantiago en Santiago de Chile.

Al cabo de un año de operación de Transmilenio se realizó una evaluación ex-post y se observó que se realizaban un 15% más de los viajes estimados. Además, en las encuestas a los usuarios, el 10% dijo haber cambiado de modo desde un vehículo particular; esta variable que no fue considerada en la modelación inicial explica en parte, la diferencia en la demanda del sistema (Chaparro, 2002).

También existen ejemplos donde se han aplicado sólo medidas de prioridad al transporte público como vías exclusivas o pistas sólo bus, varios de ellos en Inglaterra. En general la información reportada está orientada a las modificaciones en los tiempos de viaje y en los patrones de las líneas de transporte público, y no a los cambios en la demanda. (Bus Priority).

Lo detallado en los párrafos anteriores evidencia que existe una tendencia a no asociar que estas decisiones pueden tener impactos relevantes en la demanda del sistema de transporte. Algo similar ocurre cuando se revisan los casos donde se han implementado vías reversibles, y se reportan sólo las mejoras en congestión y tiempo de viaje, pero nada respecto de la demanda.

La experiencia de tarificación de una zona sobre la cual se puede encontrar más información es Londres. En febrero de 2002 se comenzó a cobrar por circular en el área centro durante el día. Esto generó cambios en los patrones de viajes dentro de la ciudad.

Dentro de los resultados, más relevantes, para los objetivos de esta tesis están los cambios que realizaron las personas en sus viajes. Mori (2004) realizó un estudio detallado de los impactos sociales de la medida en Londres, recopilando información con entrevistas realizadas antes y después de implementarla (más de un año). Las encuestas se realizaron en hogares (3 barrios dentro de la zona de cobro y otros 4 en el resto de Londres), y sin bien la intención de la muestra no fue tener representatividad de toda la ciudad, sí muestra una tendencia.

La siguiente información es sobre un viaje en específico que las personas describieron en detalle, antes y después de la implementación de la medida. Se encuestaron a 367 personas en el área de cobro y 390 en el resto de la ciudad.

Tabla 3. Cambios en los viajes realizados en Londres entre 2002 y 2003

	Viajes originados en la zona centro (%)	Viajes originados en el resto de la ciudad (%)
Sin cambios	79	68
Con algún cambio	21	32
Cambio de	modo*	11
	periodo*	9
	destino*	5
	destino dentro de la zona**	9

* Los valores pueden sumar más de 21% o 32% pues se pueden hacer más de un tipo de cambio.

** Valor calculado sólo sobre los viajes cuyo destino final estaba dentro de la zona de cobro

Fuente: (Mori, 2004)

La información que presenta la tabla anterior nos demuestra que tanto los viajes originados en la zona centro como aquellos fuera de ella —en su mayoría—, han sufrido cambios de modo y/o periodo. Sin embargo, se observa entre un 20% y 25% donde lo que varía es el destino. Estos resultados son previsibles, porque alterar el modo es una decisión exclusiva del viajero; el cambio de periodo no supone cambios en infraestructura (p. ej. llegar más temprano al lugar de trabajo o estudio), pero el cambio de destino implica modificar sustancialmente las actividades a realizar.

Además, se observa mayor variación en viajes originados fuera de la zona de cobro. Esto puede suceder porque lejos de ésta, los viajeros tienen más opciones de cambio, debido a que sus viajes no se originan en la zona de restricción.

En Chile se tienen variadas experiencias con las medidas primarias y complementarias de gestión de tránsito expuestas por Fernández (1999). A continuación, algunos ejemplos:

- las vías exclusivas,
- las mejoras al transporte público,
- *gating*
- y el control de estacionamientos.

Sin embargo, éstas se han considerado sin tener evaluación de sus beneficios a priori y se han validado *ex post* con sus resultados, y no siempre aplicando metodologías adecuadas. Esto en las vías exclusivas y *gating* no reporta mayores inconvenientes, debido a su bajo costo de implantación; pero en la construcción y control de estacionamientos obtener resultados desfavorables es perjudicial para la ciudad, por los altos costos sociales y de construcción en que se incurre.

También se han implementado medidas de gestión que no necesariamente van en el sentido de su objetivo general: el uso racional de los recursos, como es el caso de las vías reversibles, sobretudo en vías de uso exclusivo de transporte privado. Si bien, las medidas se han validado en el sentido que logran bajar los tiempos de viaje de los usuarios de transporte privado, no queda claro que sean positivas al revisar la situación en un nivel más amplio que la vía o el corredor (p. ej. comuna o ciudad).

Por todo lo dicho, anteriormente, es preciso encontrar una herramienta adecuada, que pueda cuantificar los beneficios de las medidas de gestión de demanda de tráfico.

Una de las experiencias más exitosas de la implementación de medidas de gestión de tránsito en Chile es la gestión de la UOCT en Santiago, controlando las redes semaforizadas de la ciudad, aunque se aprecie más la gestión de la capacidad, que la gestión de la demanda de tráfico.

Existen también, medidas dispuestas a mejorar la circulación del transporte público como, la construcción de las vías exclusivas de Av. Grecia y la Alameda, que pueden considerarse no completamente exitosas. En Av. Grecia el tiempo de viaje para el transporte público (en el corredor) aumentó, a pesar de eso *“la percepción de los usuarios es muy positiva; sobretudo en lo relativo a tiempo de viaje, seguridad peatonal, comodidad y conducta de los pasajeros”*. (Macro, 1996). En la Alameda se optimizó el tiempo de viaje en el transporte público, pero simultáneamente se mejoró el de los privados, esto sin duda no desincentiva el uso del automóvil.

Además, en esta ciudad subsisten experiencias negativas como los estacionamientos del metro Escuela Militar, donde no se logra que la gente baje del vehículo y siga su viaje en metro (cambio de modo). Por cierto, la política tarifaria de éstos —similar en su estructura y nivel a sitios céntricos—, no incita a detenerse y a los viajeros les resulta más atractivo continuar en sus vehículos, hasta el centro mismo.

Para definir cómo se puede modelar un sistema de transporte, considerando evaluar los impactos de las medidas de gestión de la demanda, es necesario saber cuáles son las variables que resultan afectadas. Así podemos determinar, dentro de cada etapa del modelo clásico, qué parte debe ser capaz de asumir los cambios que estas medidas representan.

Un efecto esperado de algunas de ellas es reducir los viajes (por ejemplo: tarificación vial o políticas de tiempo de trabajo flexible). Esto puede ser para todo el día o sólo en un periodo del día, es decir, cambiar los horarios de los viajes. En este caso es esencial conseguir modelar para distintos periodos.

Reproducir adecuadamente, la generación de viajes después de implementar medidas que los reduzcan considera —dentro de las variables explicativas de los modelos— por ejemplo, la posibilidad de trabajar en casa u horarios flexibles de entrada al trabajo o al estudio. También es importante, la interacción entre esta etapa y las siguientes, ya que la decisión de hacer o no un viaje o cambiar su horario, está muy relacionada con el tiempo del viaje, los modos disponibles, y los costos que pueden variar a lo largo del día, etc.

Cuando se controlan los estacionamientos en el área céntrica, o se efectúa el cobro por circular dentro de un área, se está incentivando a cambiar de modo; pero esto también puede producir un cambio de destino y por tal influye en la etapa de distribución de los viajes, tales variaciones se pueden asumir si se modifican los costos asociados a sus restricciones. Esta etapa es afectada por las sucesivas, ya que las decisiones del destino de un viaje dependen de la existencia de algún modo de transporte, el costo y el tiempo de viaje.

Tal vez, el cambio de modo sea el efecto que más se repite en la implantación de medidas de gestión de la demanda, ya que, cuando un viaje no puede modificarse como en el caso de un trabajo que necesita de un horario estricto, únicamente, se puede lograr un cambio modal. El mismo, puede variar totalmente (p. ej. de auto a bus) o puede hacerlo sólo en parte (p. ej. auto hasta el metro y desde ese punto al destino). En esta etapa es necesario tener modelos que incluyan estos modos combinados, y también modos no motorizados como son la caminata y la bicicleta.

Dentro de las variables que pueden aportar "información relevante" es necesario, incluir aquellas relacionadas con las facilidades a peatones o uso de bicicletas como ciclovías, estacionamientos *ad-hoc* o veredas anchas. También, se deben agregar los costos de los estacionamientos y su disponibilidad en la zona de destino. La partición modal se ve afectada por la asignación del flujo y los pasajeros, y dependiendo de esto se pueden variar ciertos parámetros, como el tiempo de viaje, el costo y la disponibilidad de los estacionamientos.

Al momento de hacer la asignación de la demanda a la red vial es fundamental, que el modelo usado permita construir una red flexible que pueda tener distintas clases de arco, con capacidad y velocidad propia y que además, incluya y sea sensible a los cambios en la programación de semáforos.

Allsop (1983) hace una revisión detallada de las características que debe tener el modelo de asignación para representar —de la mejor forma posible— los cambios que producen las medidas. En esta revisión se plantean algunos de los problemas de los algoritmos de asignación y como se han ido superando, complementando el enfoque teórico con métodos heurísticos. A continuación, se presentan los fundamentos más relevantes que revisa el autor.

El principio base para el desarrollo de las técnicas de asignación es el principio de Wardrop, donde se asume que todas las rutas usadas —entre un mismo par origen-destino—, tienen el mismo costo, y este es menor al de cualquier otra ruta no usada. Una variante en esta hipótesis supone que algunos conductores usarán otras rutas fuera de las más baratas. Para esto, un modelo del tipo *logit* también nos lleva a un problema de minimización convexo, modelo del tipo Dial (Sheffi, 1985).

En el contexto de la gestión de tráfico, las demoras y colas en intersecciones dependen de los flujos en las demás ramas que tienen prioridad, sobre la que es representada por el arco. En este sentido, el modelo de asignación debe asumir que el costo (tiempo, combustible, etc.) en un arco, no depende exclusivamente de su propio flujo, sino también, de los flujos en los arcos que llegan al mismo nodo.

En redes urbanas donde existe congestión, si no se cumple con los requerimientos para usar una técnica determinística de asignación por equilibrio a usuario, se puede usar un método heurístico conocido como carga incremental. Este método, propone comenzar con una red vacía y asignar sólo una proporción de la matriz de viajes, con los costos asociados a cero flujos. Después, se van haciendo iteraciones donde cada vez, se calculan los costos con los flujos asignados y se va asignando otra proporción de la matriz —en base a los nuevos costos— y más aun, se puede llegar incluso a quitar parte del flujo asignado.

Aunque, hayan pasado más de 20 años desde que se hizo este desarrollo, son estos mismos principios los que siguen siendo válidos hoy en día y, en general los métodos presentados, son los disponibles en los *softwares* de asignación en el mercado.

2.2 MODELOS DE TRANSPORTE

Los modelos de transporte se han desarrollado para predecir el comportamiento de los usuarios de un sistema y de esta forma, al incluir un proyecto, cuantificar los beneficios que éste aporta.

Algunos modelos de tipo microscópico van al detalle de operación vehículo a vehículo, pero también consideran la demanda fija y asignada, con lo cual obtienen muy buenos parámetros de operación del sistema, pero no sirven para evaluar medidas de gestión, que cambian al menos, la asignación de los flujos. Otros de tipo mesoscópicos, se ocupan sólo de distribuir los flujos en una red o evaluar su operación asumiendo la demanda fija, con lo cual no funcionan para evaluar medidas que produzcan cambios en la matriz de viajes.

Finalmente, existen aquellos de tipo macroscópico que realizan las cuatro etapas del modelo tradicional de transporte, de forma secuencial o simultánea, dependiendo del tipo y del propósito para el cual se aplique. Con éstos, dependiendo del nivel de detalle que se logre, se pueden evaluar algunas medidas, pero con limitaciones tales como, no poder incluir la programación de redes de semáforos, o considerar el día entero y no por periodos.

A continuación, se hace una descripción de ciertos modelos tipo microscópicos, mesoscópicos y macroscópicos concentrando su presentación en las relaciones entre las etapas de oferta y demanda y el tipo de red requerida, dado que, estos son los aspectos más relevantes para la modelación de las medidas de gestión de tráfico.

GETRAM (TSS, 2000) modela el flujo al detalle de los vehículos y será el de tipo microscópico que se estudie (para otros, ver Burgos, 2004). SATURN (Van Vliet, 1993) y TRANSYT (Vincent et al., 1980) son del tipo mesoscópicos, más agregados, que consideran bastante detalle en las variables, pero usan histogramas cíclicos de flujo en vez de modelar el flujo vehículo a vehículo. Los últimos serán ESTRAUS (MIDEPLAN, 2001), EMME/2 (INRO, 1998) y TRIPS (CITILABS, 2001), que son modelos donde se trabaja, generalmente, con áreas grandes y cierto nivel de agregación.

2.2.1 GETRAM

Este microsimulador de tráfico permite representar la operación del sistema vehículo a vehículo (TSS, 2000) y logra gran precisión, en la predicción del comportamiento de los usuarios, en condiciones donde la demanda está fija y asignada, es decir, se suponen conocidos los flujos por los distintos dispositivos viales.

El propósito de este tipo de modelo es representar la realidad y simularla, con lo cual la red se configura muy detalladamente. Necesita información sobre la geometría de las vías, el número de pistas y los movimientos permitidos. También, requiere que se definan las intersecciones, el tipo de regulación y los parámetros de operación de aquellas semaforizadas.

La simulación tiene ventajas respecto al análisis analítico, ya que puede captar todas las interacciones entre los tipos de vehículos y los tipos de conductores. Sin embargo, también se necesita una gran cantidad de información inicial, no sólo geometría de las vías, sino información detallada del comportamiento de los usuarios. En general los simuladores permiten obtener información gráfica, que suele ser muy útil, para identificar ciertos problemas y sus causas.

A pesar de sus ventajas, respecto de la evaluación de medidas de gestión de la demanda, GETRAM presenta problemas como no lograr representar los cambios en el comportamiento de los viajeros (ruta o destino), pero sirve como herramienta de ayuda capaz de realizar un mejor cálculo de parámetros operacionales (Montero, 1998; Siegel y de Grange, 2001).

2.2.2 TRANSYT

Este modelo analiza el comportamiento del tráfico y define el “mejor” plan de control de semáforos (Vincent et al., 1980). El análisis que entrega consiste en el cálculo de los parámetros operacionales como capacidad, demoras, y largo de cola en forma analítica, es decir, utilizando formas analíticas con valores promedio para el periodo analizado. Para esto, necesita una demanda asignada con flujos promedio, para cada movimiento, en cada intersección.

La red en este modelo está definida por nodos y arcos. Los nodos, que representan intersecciones, pueden ser controlados por señales de prioridad o semáforo, y en estas últimas se necesita la información sobre el tiempo de ciclo, las fases y los desfases con los demás semáforos de la red. Los arcos, que unen los nodos, necesitan información del tipo movimientos permitidos, flujo de saturación, largo del arco, velocidad promedio, demoras en paraderos para los buses, etc. (Vincent et al., 1980).

TRANSYT no es eficiente para evaluar medidas de gestión de la demanda, pues considera como dato de entrada la demanda asignada, y no logra representar ningún cambio en el comportamiento de los usuarios. Puede ser una herramienta útil para conocer los parámetros de operación de distintos escenarios, pero necesita información externa para lograrlos.

2.2.3 SATURN

Es un modelo de simulación y asignación de tráfico, que en principio fue creado para analizar medidas de gestión de tráfico, pero ha ido ampliando sus funciones (Van Vliet, 1993). A partir de matrices de viaje por modo, distribuye los flujos en una red dada, y calcula los parámetros operacionales para comparar distintos escenarios, pero no se hace cargo de los cambios en la demanda.

Trabaja con dos tipos de redes: interna (*inner*) y externa (*buffer*), ambas configuraciones se hacen con nodos y arcos. En la red *inner* los nodos son diferentes y dependen del tipo de regulación de la intersección (prioridad, semáforo, rotonda, etc.) y requieren más información según dicha operación, por ejemplo: en semáforos se requerirán fases y desfases. En la red *buffer* no se considera distintos tipos de nodos, pero para los arcos se necesita: el número de pistas, la velocidad promedio, el largo del arco, el flujo de saturación por movimiento, y se puede calcular la curva flujo-velocidad.

La asignación se puede hacer de forma determinística, por principios de Wardrop, o estocástica y el programa permite que el usuario decida, según lo que esté modelando. El cálculo de parámetros operacionales se hace de forma analítica (Van Vliet, 1993).

Cuando se producen variaciones, sólo en la etapa de asignación de los viajes a la red, esta herramienta puede ser muy útil, porque permite tener distintos tipos de nodos, controlados por señales semaforizadas o de prioridad, los arcos pueden ser caracterizados detalladamente y de esta forma, tener una buena asignación en los flujos. Cuando las medidas involucran

alteraciones en otras etapas, este modelo deja de ser adecuado, ya que no puede percibir los cambios en la demanda.

2.2.4 ESTRAUS

Este modelo computacional resuelve 3 de las 4 etapas del modelo clásico de transporte, usando equilibrio simultáneo, lo cual permite evaluar las interacciones entre la demanda y la oferta. La generación de viajes se excluye de este proceso, es decir, se asume fija y previa al proceso de equilibrio (MIDEPLAN, 2001).

Con ESTRAUS se obtiene el equilibrio simultáneamente en la etapa de asignación de la red de transporte privado, la asignación de pasajeros a transporte público, la elección de la partición modal y la distribución. Los modelos de demanda trabajan con tres propósitos y distintas categorías de usuarios; según nivel de ingreso y propiedad de auto. Para la distribución se usan modelos gravitacionales doblemente acotados, mientras que para la partición modal se usan aquellos de elección discreta tipo *logit* (Ortúzar, 1998 y Ortúzar, 2000).

Opera con dos tipos de redes: básica y de transporte público. La primera se define por un conjunto de nodos (intersecciones y centroides de zona) y arcos (calles). En esta red no se diferencian los tipos de nodos, no se incluye el tipo de regulación de las intersecciones, y los arcos tienen costos de operación, asociados a los parámetros de distancia, capacidad, congestión, etc., pero no se incluyen estos parámetros por separado.

Se define como transporte público a los modos simples bus, taxi colectivo y metro, y los modos combinados bus - metro y taxi colectivo - metro. Debe existir una red para cada modo simple y cada modo combinado. Estas redes se definen como un subconjunto del conjunto de nodos de la red básica y un conjunto de líneas por modo. La asignación a la red privada y a las redes de transporte público se hace de acuerdo con el primer principio de Wardrop.

Las medidas de gestión de la demanda, generalmente, afectan a más de una etapa del modelo clásico y con esta herramienta es posible modelar 3 de las 4 etapas de forma simultánea. Pero este modelo no considera la generación de viajes, con lo cual es insensible a cambios producidos por medidas de gestión que afecten los horarios del viaje o la decisión de realizarlo.

Respecto de la partición modal, al considerar sólo modos combinados con el metro, se pierde potencialidad para modelar incentivos al uso del modo bus y combinaciones bus-bus o bus-automóvil. Adicionalmente, no considera los modos no motorizados, eliminando la posibilidad de evaluar medidas de gestión orientadas a incentivar su uso. Por último, al privilegiar la simultaneidad en el proceso de iteración entre las etapas, no es posible considerar el tipo de regulación de las intersecciones y esto no permite representar cambios en la programación de semáforos, y como los arcos incluyen poca información (características), no se pueden calcular en detalle, los parámetros de operación.

2.2.5 EMME/2

Este modelo de transporte es bastante amplio y flexible, mantiene una filosofía de trabajo que distingue entre dos ámbitos: demanda y oferta; y el equilibrio que se debe establecer entre ambos (INRO, 1998). Para la demanda se usan escenarios con cambios de población, uso de

suelo, niveles socioeconómicos, etc. Para la oferta se dispone de distintas redes o parámetros dentro de ellas.

EMME/2 no tiene definido, previamente, un proceso para la modelación de demanda sino que ofrece varias herramientas para manipular matrices y formalizar tal modelación. Contiene una calculadora de matrices, que permite hacer gran cantidad de operaciones con las matrices, procesos de balance en dos y tres dimensiones, y funciones para hacer operaciones con zonas intermedias. A partir de estas herramientas, se puede hacer cualquier modelo de generación, con ayuda de software estadístico, y usando la calculadora de matrices.

Con los procesos de balance en dos dimensiones se logran modelos de distribución de crecimiento, gravitacionales o de entropía. Usando las tres dimensiones se obtienen modelos más refinados, con más restricciones. Para partición modal tampoco hay modelos fijos, pero al igual que en la generación, es posible hacer cualquier tipo, usando como ayuda algún software estadístico o econométrico. Con las funciones para hacer operaciones en zonas intermedias se puede modelar modos combinados. Este modelo permite incluir variables como los costos de estacionamiento —gracias a la calculadora de matrices—, al igual que hacer segmentos de mercado o matrices de usuarios cautivos. También es posible ajustar las matrices, según los datos observados.

En el ámbito de la oferta se usa una red compuesta por nodos y arcos. Los nodos corresponden a centroides, intersecciones o paraderos de buses. También se definen por el tipo de movimientos permitidos o penalizados en las intersecciones. La red tiene atributos básicos como largo de los arcos, coordinación de los nodos o número de pistas, y también es posible incluirle más parámetros, definidos por el usuario.

Es posible definir hasta 30 modos, dentro de los modos auxiliares de transporte público es posible incluir caminata o bicicleta. La asignación se puede hacer por Wardrop, determinística, o estocástica. Además, de considerar el tiempo de viaje permite calcular el costo generalizado y es posible hacer 12 categorías de usuario con diferentes costos generalizados. Puede llegar a considerar un flujo fijo asignado, como puede ser el flujo de buses de líneas y frecuencia fija, o recorridos de vehículos comerciales o de servicios. También puede hacer la asignación de funciones de demanda y no demanda fija.

El sistema de transporte público se define por las líneas, que tienen frecuencia, tiempo de viaje e itinerario fijo. Se tiene en cuenta la información sobre la estructura tarifaria. La asignación a transporte público se hace usando hiperrutas (estrategias) óptimas, y es posible crear sistemas muy congestionados. La representación del transporte público tiene la limitación de no poder modelar correctamente el tiempo de espera en paraderos por transferencia de pasajeros.

En la generación y distribución, permite incluir cualquier variable (p. ej. horarios de trabajo o estudio, días de trabajo en casa, etc.) y nuevas restricciones. En la distribución se pueden incluir los cambios en las matrices de costos y si resulta necesario incluir una nueva restricción. La modelación soporta modos no motorizados y arcos con sus propios atributos, y esto permite modelar facilidades propias. Es importante que se puedan incluir variables como la disponibilidad de estacionamiento, además de sus costos. En la asignación de la red, no se incluyen las interacciones entre la demanda y la oferta, pues supone a la demanda como algo fijo y solo la operación de la oferta se modifica hasta que se llega a un equilibrio.

EMME/2 por definición es flexible, se acomoda generalmente a las necesidades del usuario, y puede llegar a reflejar los cambios que se produzcan al implementar las medidas de gestión de demanda de tránsito. En las etapas de demanda y según la información disponible permite al modelador crear casi cualquier tipo de modelo.

2.2.6 TRIPS

Es un modelo de 4 etapas que puede tener distintos niveles de complejidad y detalle, dependiendo de la información y de aquello que se requiera modelar (CITILABS, 2001). Quizás su mayor ventaja sea la flexibilidad para definir el fenómeno que se desea simular, mediante un lenguaje de programación propio. Permite desarrollar las etapas de demanda desde la información básica del sistema de actividades, o ajustar las matrices de acuerdo con la nueva información. Es posible definir redes privadas de vehículos motorizados y no motorizados, de acuerdo al fenómeno que se desee modelar. De igual forma, es posible definir redes de transporte público, considerando la combinación de modos que se desee y para la cual se posea información.

Los modelos de generación son flexibles, definidos mediante la especificación de las formulaciones y de las variables independientes que las explican y en función de la información disponible. Dentro del programa existen ayudas para convertir la información de encuestas de viajes origen-destino, así como, de pareo de placas patentes. Respecto a los modelos de distribución, estos consideran una forma funcional que permite especificar la familia de los modelos de distribución más frecuentes (exponencial, potencial o mixto), y la forma funcional del costo generalizado a considerar. El software da la posibilidad de crear las matrices de costo o utilidad y también permite calcular “costos de paso”, es decir, de A a B pasando por C y/o D. Para la partición modal es posible utilizar modelos *logit* de distintos niveles de complejidad, multinomial, jerárquico, e incluso es posible, desarrollar modelos conjuntos con 2 ó 3 etapas de la demanda. También en esta parte se permite incluir modos nuevos.

La red que se usa para el modelo, se define como nodos y arcos. Los nodos se definen por tipos dependiendo de la regulación, incluyendo redes de semáforos actuados por vehículos. Los arcos se pueden dividir por tipos y tal división depende del usuario (p. ej. por jerarquía vial). Cada tipo de arco tiene ciertas características, pero también es posible asignar diferentes características en arcos de un mismo tipo. Existe la posibilidad de tener nodos o arcos inusuales, como por ejemplo, paso de ferrocarril. El modelo puede usarse en redes que estén saturadas y esto incluso puede conducir a cambios en la demanda. A los viajeros se les puede dividir en categorías o usar costos generalizados de viaje, en vez de sólo tiempo para la asignación. Los vehículos se pueden dividir por tipos, por ejemplo: livianos, buses, vehículos comerciales, etc.

Con la modelación del transporte público se puede asignar pasajeros a líneas, simular cambios en las estructuras tarifarias, o modelar situaciones saturadas. La red de transporte público tiene arcos de sólo transporte público, de sólo caminata o de uso compartido. El sistema de transporte público necesita información sobre los modos, las empresas, estructura tarifaria, llegada de pasajeros y vehículos, entre otros, y cada línea necesita ser descrita por la ruta, la compañía, etc. La modelación del transporte público tiene la limitación de no poder modelar correctamente el tiempo de espera en paraderos por transferencia de pasajeros.

Al ser un modelo flexible y que puede llegar a tener gran nivel de detalle, puede asumir una gran cantidad de los cambios que producen las medidas de gestión de la demanda de tránsito.

Este modelo permite simular las 4 etapas del modelo clásico, o un número menor de éstas, según las necesidades del modelador, permitiendo realizar iteraciones entre las etapas que se elijan para lograr la convergencia y el equilibrio entre ellas. Su lenguaje de programación incluso permite simular modelos de demanda conjuntos, especificados explícitamente. En consecuencia, se logra modificar la demanda según los cambios que producen las medidas en la asignación y se puede apreciar el efecto de medidas de gestión en la red sobre la demanda.

2.2.7 Elección del modelo a usar

Hasta el momento, se han desarrollado modelos de transporte con diferentes propósitos y niveles de detalle, por esto pueden llegar a tener entre sí, características muy distintas. En los modelos estudiados anteriormente apreciamos tales diferencias. La tabla siguiente muestra las principales disparidades entre cada modelo considerando su carácter microscópico, mesoscópico o macroscópico.

Tabla 4. Características de los modelos por tipo

Tipo	Uso	Ejemplo de modelos	Forma de modelación de tráfico
Microscópico	Análisis operativo	GETRAM	Modelo usa teoría de seguimiento vehicular Resultados: d, h por vehículo** Red: Σ vehículo Resolución: vehículos
Mesoscópico	Análisis táctico - operativo	TRANSYT SATURN	Modelo usa histogramas cíclicos de flujo Resultados: D, H, Lq por arco* Red: Σ arco = Índice de rendimiento de la red Resolución: pista
Macroscópico	Análisis estratégico	ESTRAUS EMME2 TRIPS	Modelo usa curva v – q por arco Resultado: velocidad promedio por arco Red agregación de arcos Resolución \geq cuadra

* D = tasa de demora (veh-h/h); H = tasa detención (det/h); Lq = longitud de cola (veh)

** d = demora promedio por vehículo (veh-h/veh); h = detención promedio por vehículo (det/veh)

Fuente: Elaboración propia

Modelos microscópicos y mesoscópicos (GETRAM - TRANSYT) usan redes detalladas, pero demanda fija y externa. Con ellos se puede obtener el funcionamiento del sistema, detalladamente, según los parámetros operacionales. Esto puede ser muy útil si se combina con modelos que simulen la demanda y hagan su asignación, ya que estos modelos operacionales necesitan los flujos que dan como resultados los modelos de demanda y asignación, y a su vez estos últimos también pueden usar los parámetros operativos encontrados para hacer una mejor modelación (Montero et al., 1998; Siegel y de Grange, 2001).

Los resultados que se obtienen con cada uno de los modelos varían, por el nivel de detalle que se usa. Así como, GETRAM puede dar unos resultados mejores al incorporar todas las interacciones entre vehículos, también necesita información mucho más detallada sobre las vías, sobretodo en geometría, de lo que requerirá TRANSYT.

Otros modelos mesoscópicos, como SATURN, incorporan la etapa de asignación de flujos a la red, por lo que pueden ser muy útiles cuando los impactos esperados no son lo suficientemente grandes como para generar cambios en la demanda. Sabemos que

necesitamos una herramienta que permita evaluar distintos tipos de medidas de gestión de la demanda de tránsito, y este tipo de modelo, en particular no contribuye.

En general con los modelos macroscópicos vistos es posible incluir muchos de los cambios que pueden traer las medidas de gestión de la demanda, pero dentro de cada modelo hay mayores dificultades en distintos aspectos para lograr hacerlo.

Los tres modelos tienen dificultades para incluir todas las interacciones entre la demanda y asignación a la red. ESTRAUS hace una modelación simultánea que no incluye la generación y los efectos de la interacción de ésta con las otras etapas, no se pueden ver. En TRIPS, la modelación es secuencial y no se incluyen la interacción entre etapas, menos entre distribución y partición modal, pero es posible hacer iteraciones pasando la información resultado de una etapa a las otras y así modelar la interacción. De la misma forma en EMME/2 tampoco se modela explícitamente la interacción entre las etapas, pero es posible pasar la información de un modelo interno a otro y hacer algún tipo de iteración.

ESTRAUS tiene limitaciones con los modos de transporte combinados, ya que sólo considera combinaciones con el metro, además, como tiene los modos predefinidos no permite agregar más y no considera ninguno no motorizado. Tanto TRIPS como EMME/2 en este aspecto funcionan mejor, ya que en ambos es posible modelar modos combinados y ambos tienen facilidades para hacerlo. En TRIPS existe la posibilidad de calcular “costos de paso” y a partir de esto representar los modos combinados. En EMME/2 se pueden usar las funciones para operaciones con zonas intermedias para modelar estos modos. En estos dos modelos también se pueden incluir modos no motorizados, al menos la caminata.

Otra diferencia que se puede encontrar, entre estos modelos, es la forma en que se configura la red. ESTRAUS considera una red bastante simplificada, dado que no puede incluir información sobre el tipo de nodos, su regulación o parámetros de los arcos, diferentes del costo asociado. EMME/2 permite mayor detalle en esto, ya que maneja atributos básicos de la red, como control de las intersecciones, longitud del arco, número de pistas, etc. También permite adicionar atributos extra de la red, donde el usuario decide qué información agregar. En TRIPS los atributos son propios para cada arco y nodo, y se pueden definir diferentes tipos de arcos y los nodos se definen por el tipo de regulación en las intersecciones y los parámetros asociados a ésta.

Según sea el diseño de cada programa, existen grandes diferencias. ESTRAUS es bastante rígido y tiene predeterminada la forma de los modelos que usa (modelo gravitacional doblemente acotado para la distribución) y muchas de las variables (modos disponibles). TRIPS trabaja sobre una base de la forma en que se modela, pero es bastante flexible al disponer distintos tipos de modelos para cada etapa y al permitir al usuario definir los modos, los tipos de arcos y otras variables fundamentales. EMME/2 se comporta más como un conjunto de ayudas para la modelación, dado que deja la definición, la creación de los modelos, y todas las variables que necesite en manos del modelador, con algunos requerimientos mínimos.

Entre estos tres modelos, conociendo sus fortalezas y debilidades, podemos decidir que ESTRAUS no es muy conveniente por la rigidez de sus modelos, por la cantidad de información predefinida y las limitaciones en la definición de la red. Entre TRIPS y EMME/2 no se observan mayores diferencias en la modelación. Para esta tesis se elige TRIPS por dos razones evidentes, se dispone de licencia de uso, y el uso es más sencillo que EMME/2.

3 METODOLOGÍA

En los siguientes párrafos se desarrolla la forma de abordar el problema, comenzando con una descripción de los pasos seguidos en TRIPS para construir el modelo, y una proposición de las medidas con las que se quiere experimentar. Además, se revisa la relación existente entre las distintas etapas del modelo clásico de transporte, y se realiza un análisis de la herramienta elegida en función de las medidas de gestión de tráfico elegidas. Por último, se presenta un desarrollo sobre curvas flujo-velocidad para el transporte público, para superar algunas debilidades encontradas.

En consecuencia, con el objetivo general de esta tesis —medir cuantitativamente los impactos de algunas medidas de gestión de tránsito—, será necesario construir un modelo en TRIPS que permita desarrollar experimentos con las medidas. El mismo podría haberse construido con información ficticia, aunque resultara un gran esfuerzo poder validar los supuestos. Más, se opta construir el modelo usando la información de modelos ya calibrados de demanda e información detallada de una red existente. Esto no sólo ahorra esfuerzos, sino que asegura una mayor confianza en los resultados.

En tal sentido se busca información de modelos clásicos de transporte, calibrados para ciudades intermedias en Chile, en La Secretaría Interministerial de Planificación de Transporte (SECTRA) organismo que desarrolla constantemente estudios donde se deben calibrar este tipo de modelos para ciudades medianas. Con mejor disponibilidad en cuanto a la información en los informes y anexos, se elige la ciudad de Valdivia, usando el informe de CIS (1998b).

Con la información recopilada se procede a programar el modelo, siguiendo los pasos descritos a continuación:

1. Construcción de la red: características de los arcos, ubicación de los nodos.
2. Codificación de intersecciones.
3. Construcción de líneas de transporte público: secuencia de nodos, frecuencia, modo y tarifa.
4. Codificación modelo de generación y atracción de viajes.
5. Codificación modelo de distribución.
6. Codificación modelo de partición modal.
7. Codificación modelo de asignación.

Al programar se necesitó vincular los resultados de unas etapas con otras, no sólo en la forma secuencial, donde los vectores de la generación y atracción de viajes son la información base para el modelo de distribución, sino también en vínculos como los costos producidos en la etapa de asignación, que son necesarios como información base en la etapa de partición modal. También se programa un bucle para asegurar la convergencia del modelo, precisamente por los vínculos no secuenciales.

Con el modelo programado se está en condiciones de realizar los experimentos. Estos consisten en la implementación de las medidas elegidas, en ciertos escenarios. Así se pueden obtener resultados tanto de los indicadores de la red, como grados de saturación, velocidades o consumo de combustible, como también la partición modal y la distribución.

La elección de las medidas desarrolladas en los experimentos se hizo por distintos criterios, cierto interés personal sobre algunas medidas (debido a que se han implementado en ciudades de Chile). También por un criterio muy importante: revisar si por las restricciones

propias de la información disponible para la situación base eran factibles de implementar, medidas que tenían que ver con modos combinados, por ejemplo: *park and ride*, o medidas orientadas a modos no motorizados como la bicicleta, no podían ser modeladas porque estos modos, no estaban considerados dentro del modelo de partición modal.

Se buscaron con preferencia, medidas que se pudieran modelar sólo con cambios en la oferta de transporte (arcos, nodos, líneas de transporte público, costo generalizado, etc.), precisamente para ver el efecto de medidas puras de gestión de tránsito sobre la demanda.

Dentro de éstas se priorizó el transporte público, como pistas sólo bus y vías exclusivas, porque esta medida tiene ventajas, tanto en la forma de introducirse en el modelo (implica realizar sólo un cambio en la red), como en su implementación (señalización, demarcación y fiscalización). Además, se cumple con la idea de revisar medidas que se materialicen solo con cambios en la oferta de transporte. Interesa revisar esta medida, ya que ha sido implementada en ciudades de Chile, dentro de las políticas de mejoras a los modos más eficientes.

Las vías reversibles, también son una buena medida para experimentar, porque sólo se realizan variaciones en la red y en las líneas de transporte público. Esta medida es fácil de implementar y sigue cumpliendo con la idea de ser pura gestión, dado que implica solo cambios en señalización, demarcación y rediseños menores. Además, es interesante observar qué tipos de cambios se producen en los resultados, ya que ha sido implementada en Santiago de Chile, pero analizada *a posteriori* localmente y nunca a nivel de red y sistema completo.

La tarificación en una zona es otra medida interesante a revisar. Se implementa en el modelo introduciendo un cobro en algunos arcos de entrada al área de interés y en términos prácticos, se puede materializar fácilmente con portales de cobro sin detener el vehículo, (p. ej. los usados en las autopistas urbanas concesionadas). Al mismo tiempo, esta medida ha sido propuesta desde algún tiempo en el ámbito académico, pero existen pocos ejemplos donde se haya implementado.

3.1 LA RELACIÓN ENTRE LAS ETAPAS DEL MODELO CLÁSICO DE TRANSPORTE

El modelo clásico de transporte, presenta cuatro etapas donde existen relaciones en ambos sentidos entre las distintas etapas. Estas relaciones se establecen al tener una red con capacidad limitada, donde al mismo tiempo que aumentan los flujos, los costos tienden a aumentar. En la siguiente figura, se distingue el caso específico del modelo usado para el desarrollo de nuestros experimentos, considerando los componentes de cada etapa y su influencia sobre las demás.

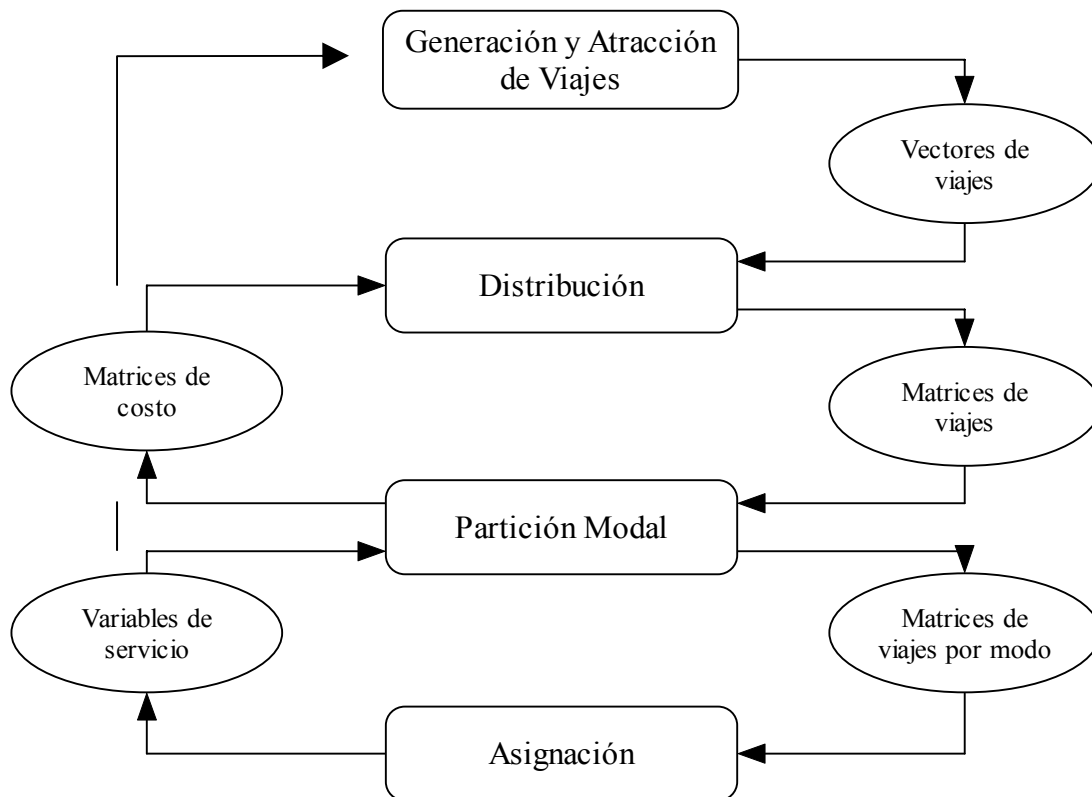


Figura 1. Relación entre las etapas del modelo clásico de transporte

La etapa de generación y atracción de viajes, en general sólo depende de variables exógenas al modelo, y ninguna variación en los costos de viaje influye en los vectores que produce. Esto es una debilidad de estos modelos y dificulta revisar el impacto sobre la demanda de viajes que tienen las medidas de gestión de tránsito (objetivo de esta tesis).

La relación entre la distribución, la partición modal y la asignación se obtiene por los costos asociados a cada viaje. Después de asignar, todos los viajes a la red, se está en capacidad de calcular los tiempos de viaje, tiempos de espera, costos de operación y demás variables de servicio, necesarias para calcular los costos de los modelos de partición modal y distribución. Por esta relación se creó un bucle entre estas tres etapas.

Para el desarrollo de los experimentos se propone crear iteraciones entre las etapas de distribución, partición modal y asignación, para lograr incluir la interacción entre las etapas.

3.2 ANÁLISIS DE LA HERRAMIENTA

Es necesario analizar si TRIPS es capaz de modelar las medidas propuestas. El análisis se basa en revisar los cambios que se tendrán que realizar sobre la red para modelar los experimentos y cómo los interpreta el programa.

En las medidas de prioridad al transporte público, la pista sólo bus implica la protección de una pista para el transporte público, pero no su confinamiento a esa pista; es decir, que se permite que los buses usen las demás pistas para adelantar, ya sea en paraderos o por

variaciones de velocidad. TRIPS no permite modelar la posibilidad de adelantamiento de los buses, debido a que usa arcos diferentes para los distintos modos. Además, en las intersecciones no se puede modelar el uso de pistas por tipo de vehículo, tan sólo por movimiento, con lo cual la línea de detención es compartida (como si existiera *set-back*, al llegar a la intersección; los vehículos de transporte público se pueden acomodar delante de los vehículos privados, para ser los primeros en salir al momento de cambiar el semáforo).

Por estos problemas de modelación, se decidió no incluir esta medida dentro del experimento, pero sí la provisión de vías exclusivas, ya que no requiere una modelación por pistas. Otro problema que se presenta en general con el transporte público es que no permite modelar de manera adecuada el tiempo de parada en paraderos, por lo cual este efecto se incluye dentro de la curva flujo-velocidad.

La modelación de cambio de sentido de las vías se puede hacer muy bien con TRIPS, ya que simplemente es necesario hacer la modificación sobre la red y modificar las líneas de transporte público.

La medida de tarificación de una zona se puede modelar bastante bien en TRIPS, mientras aquella que se quiera tarificar, corresponda a una zona completa de la zonificación definida. Dentro de la red permite dejar un anillo libre de pago, para que los viajes que no entren a la zona no paguen, pero si tengan que desviarse de la ruta a través de ésta.

3.2.1 Modelos internos

Como se dijo, TRIPS tiene una gran flexibilidad y al mismo tiempo internamente tiene operaciones ya programadas que ayudan a realizar la modelación. Revisando la factibilidad de poder implementar los modelos que típicamente se usan para las etapas de demanda, no se presentan problemas. Se pueden hacer diversas operaciones vectoriales, y en consecuencia desarrollar los modelos de generación y atracción de viajes. Tiene un módulo especial de distribución, y entre los modelos disponibles está el gravitacional doblemente acotado. También tiene programados diversos modelos de partición modal, entre los cuales se encuentra el *logit* multinomial y el *logit* jerárquico.

Para la etapa de asignación, ya se mencionó que la red que permite crear el modelo es bastante completa. Una de las cualidades de TRIPS es permitir modelar variaciones en la velocidad de los vehículos, dependiendo del flujo en los arcos. Para realizar esto, el usuario debe proveer la función de relación entre el flujo y la velocidad. Para los vehículos livianos esto no genera ninguna complicación, ya que existen relaciones muy usadas, que se calibran usando información de la velocidad de flujo libre y la velocidad normal.

Para el transporte público, especialmente, en lo que se quiere examinar con las medidas de gestión de tránsito; se esperan cambios en la velocidad debido a la variación del flujo de transporte privado en los arcos. Para los vehículos de transporte público no se pueden usar las mismas curvas flujo-velocidad de los vehículos privados, porque tienen detenciones para la transferencia de los pasajeros. Para este tema se han desarrollado distintos enfoques que se presentan en la siguiente sección.

3.2.2 Curvas flujo-velocidad para el transporte público

Como una de las medidas a modelar es dar prioridad al transporte público en tramos de vía (vías exclusivas) se revisó la forma funcional propuesta por Siegel *et al.* (2003); desarrollada para corredores de transporte público, compara las velocidades en función de la cantidad de pistas, y la posibilidad de que se produzcan adelantamientos. Sin embargo, no incorpora los cambios de velocidad por otros flujos vehiculares, fue elaborada para vías exclusivas y no sirve para el caso que se quiere modelar.

Se revisó lo propuesto por Fernández y Valenzuela (2003b) como forma funcional de la velocidad comercial para el transporte público en Santiago, pero ésta incorpora algunos parámetros muy específicos de la ciudad de Santiago, como el sentido del recorrido. Además, los parámetros fueron calibrados con los datos de vías exclusivas para transporte público.

También, está la forma funcional propuesta por Fernández y Valenzuela (2003a) con los parámetros calibrados para Concepción, que consideran buses y formas de comportamiento de los conductores similares a la ciudad experimental (Valdivia), y al de las comunas de tamaño mediano en Chile. A continuación, se muestra la función propuesta.

$$V_c = V_o e^{(-\alpha F_d - \beta T_d)} \quad (1.)$$

donde:

V_c = Velocidad comercial del bus (km/h)
 F_d = Frecuencia de detenciones (det/km)
 T_d = Tiempo detenido por detención (s/det)
 V_o, α y β = Parámetros a calibrar

En esta propuesta el valor de V_o es comparable con el valor de la velocidad sin detenciones, sin embargo, no es exactamente este valor.

Ninguna de las formas funcionales que se revisaron logra recoger de buena manera todos los efectos que se tienen en cuenta para el transporte público, por esto, dentro del desarrollo de la investigación se debió establecer una relación satisfactoria.

3.2.3 Propuesta de curvas flujo-velocidad para el transporte público

Se presenta a continuación el desarrollo de una forma funcional y su calibración, especialmente pensado en este tipo de experimentos.

Se consiguió la base de datos original con que se calibró la forma funcional propuesta por Fernández y Valenzuela (2003a), información tomada en Concepción a principios de la década de los noventa. Luego la base fue depurada de valores inconsistentes y también fue modificada, eliminando las detenciones mixtas, por más de un motivo de parada. Esto se hizo con el fin de obtener parámetros libres de influencias, debido a la interacción entre vehículos y pasajeros. Con esta base se calibró la forma funcional similar a la propuesta por Fernández y Valenzuela (2003a), pero separando el tipo de detenciones por intersecciones y por transferencia de pasajeros en paraderos. Se presenta a continuación:

$$V_c = V_r \exp(-\alpha_1 F_{dp} - \beta_1 T_{dp} - \alpha_2 F_{dt} - \beta_2 T_{dt}) \quad (2.)$$

donde:

- V_c = Velocidad comercial (km/h)
 F_{dp} y T_{dp} = frecuencia de detenciones (det/km) y tiempo por detención (s/det) en paraderos
 F_{dt} y T_{dt} = frecuencia de detenciones (det/km) y tiempo por detención (s/det) en intersecciones
 V_r : = velocidad de recorrido calculada
 α_1 α_2 y β_1 β_2 = parámetros a calibrar

De esta forma, el valor de V_r puede ser reemplazado por el valor de la velocidad de recorrido de los demás vehículos del arco, curvas flujo-velocidad de vehículos privados, y se puede recoger en esta relación la influencia de los paraderos en la velocidad del transporte público.

Para lograr esto, lo primero que se realizó fue el cálculo de la velocidad de recorrido. Con la base de datos existente se hizo una regresión para calibrar una función de tiempo en movimiento, en función de la longitud del tramo, el tiempo de viaje, el número y duración de las detenciones, y la velocidad de recorrido. La primera calibración se hizo para depurar la base de datos. La forma funcional calibrada es la siguiente:

$$t_v - t_d = \frac{L}{V_r} + \frac{V_r}{\gamma} n_d \quad (3.)$$

donde:

- t_v = tiempo de viaje (s)
 t_d = tiempo detenido (s)
 L = longitud del tramo (m)
 n_d = número de paradas en el tramo
 V_r = velocidad de recorrido (parámetro a calibrar) (m/s)
 γ = media armónica de la tasa de aceleración y frenado (parámetro a calibrar) (m/s²)

Tabla 5. Resultados de la primera calibración, cálculo velocidad de recorrido

	Parámetro	Error estándar	t
γ	0.65	0.09	7.30
V_r	6.04	0.85	7.08
r^2	0.00337		

Fuente: Elaboración propia

Si bien el ajuste no es bueno, con este valor de γ se pudo calcular la velocidad de recorrido para 2/3 de los casos y eliminar los extraños (*outlayers*), en la base de datos. Se realizó el cálculo para los casos posibles y se eliminaron aquellos donde las velocidades de recorrido calculadas fueron menores a 20 km/h y mayor a 70 km/h. Con estos cambios en la base de datos "modificada" se volvió a calibrar la función anterior y se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 6. Resultados de la segunda calibración, cálculo velocidad de recorrido

	Parámetro	Error estándar	t
Vr	10.72	0.12	89.4
γ	1.329	0.030	43.6
r ²	0.327		

Fuente: Elaboración propia

Con los datos depurados esta calibración dio resultados mucho mejores, tanto en el ajuste como en los parámetros. Con esta información se calculó de nuevo la velocidad de recorrido. Con la base de datos depurada y modificada, incluyendo el valor calculado de Vr, se calibró la forma funcional propuesta en la ecuación 1.

Tabla 7. Resultados de la calibración de la velocidad comercial

	Parámetro	Error estándar	t
α1	0.0874	0.0020	44.6
α2	0.0961	0.0032	29.9
β1	0.0275	0.0016	17.6
β2	0.0176	0.0017	10.1
r ²	0.976		

Fuente: Elaboración propia

Estos resultados presentan un muy buen ajuste y además, la relación entre los parámetros asociados a la frecuencia de detenciones y demora mantiene, cierta semejanza, a la encontrada en estudios anteriores.

Con la misma base de datos, pero sólo con los casos con detenciones por paraderos, se calibraron las relaciones entre cantidad de pasajeros, frecuencia de detenciones y demora en las detenciones. La variable independiente finalmente, usada en ambos casos fue: pasajeros que suben y bajan por km; dado que al intentar usar, sólo pasajeros que suben, se obtenían resultados con peor ajuste. El tipo de relación calibrada fue lineal sin constante y las expresiones son las siguientes:

$$td = \rho_{td} Pt \tag{4.}$$

$$nd = \rho_{nd} Pt$$

donde:

td = tiempo detenido por kilómetro (s/km)

nd = número de paradas por kilómetro

Pt = pasajeros que sube y bajan (pax/km)

ρ_{td} = tiempo detenido por pasajero (parámetro a calibrar) (s/pax)

ρ_{nd} = número de paradas por pasajero (parámetro a calibrar) (1/pax)

A continuación, se muestran los resultados.

Tabla 8. Calibración relación tiempo detenido vs pasajeros que suben y bajan por km

	Parámetro	Error estándar	t	R²
ρ_{td}	0,3130	0,030	10.302	0.414

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9. Calibración relación frecuencia de detenciones vs pasajeros que suben y bajan por km

	Parámetro	Error estándar	t	R²
ρ_{nd}	0,233	0,017	13.630	0.553

Fuente: Elaboración propia

Con estas relaciones se modificaron los tiempos y la frecuencia de las detenciones, cuando se presentan cambios importantes, en la cantidad de pasajeros transportados por los modos de transporte público en los experimentos.

3.3 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

El software TRIPS trabaja con grupos que el modelador construye usando subprogramas. Los grupos ayudan en la organización y como se planea hacer una modelación secuencial, esto permite que fácilmente los resultados de subprogramas sean usados en grupos posteriores. El diseño general del modelo consta de 5 grupos, donde se programan las distintas etapas del modelo clásico de transporte.

Estos grupos son:

- RED: donde se construyen las redes a usar, incluyendo intersecciones y líneas de transporte público,
- GENERA: donde se transforman los vectores de origen destino al lenguaje del programa para ser usados y además se pueden amplificar o modificar según las necesidades del experimento,
- DISTRI: donde se realiza la etapa de distribución de los vectores en matrices por propósito y categoría de nivel de ingreso y motorización,
- PMODAL: donde se realiza la partición modal, cuyo resultado son matrices agregadas por modo,
- ASIGNACIÓN: donde se realiza la asignación a la red de las matrices y se realizan los cálculos de costos (tiempo de viaje, distancia, consumo de combustible).

Para generar la convergencia, se incluyó un bucle (*loop*) entre las etapas de distribución, partición modal y asignación, donde los costos calculados en la asignación son usados en la distribución y partición modal.

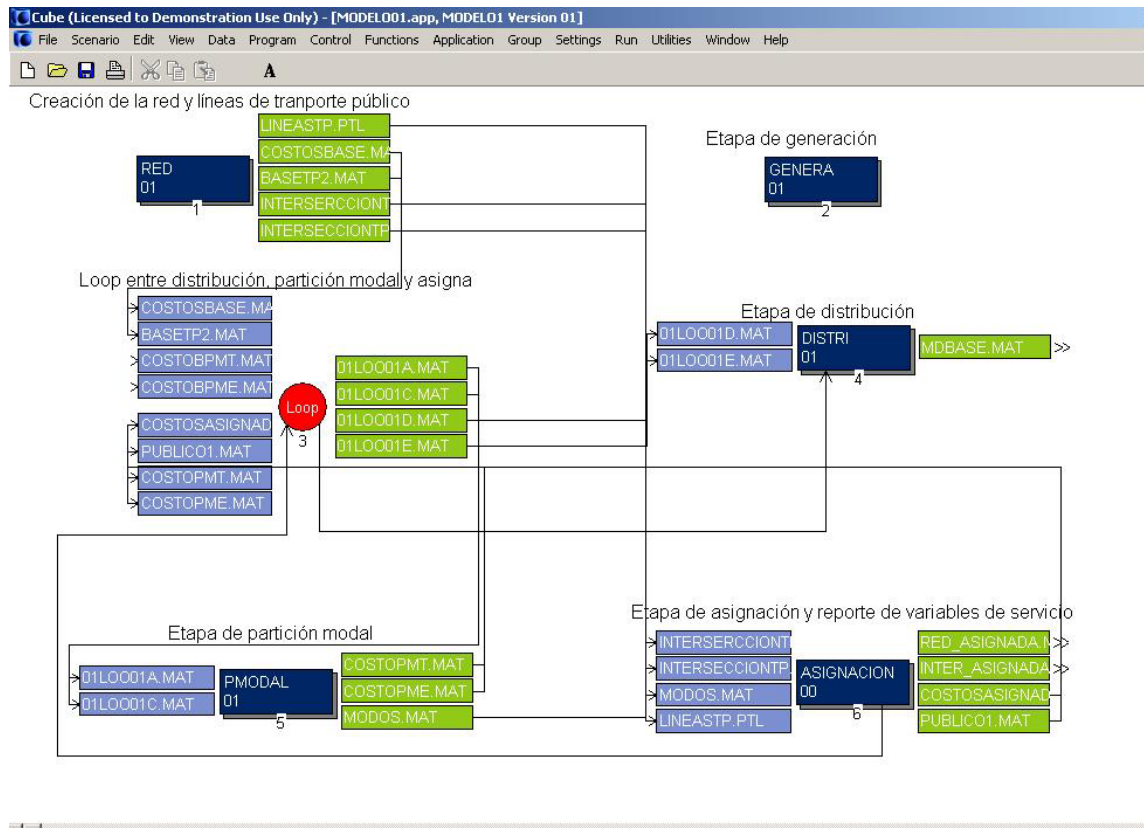


Figura 2. Disposición general de grupos (pantalla de TRIPS)

Fuente: Elaboración propia

Lo primero que se construyó fue la red base, con la información descrita en el capítulo 4. Los principales parámetros que se definieron en cada arco fueron:

- distancia,
- capacidad,
- velocidad (aunque en la asignación se recalcula por la curva flujo-velocidad),
- tipo de arco (*linktype*),
- código de jurisdicción (*jurisdiction*),
- índice de capacidad (*capindex*)

Los tres últimos parámetros son de ayuda al modelador. El índice de capacidad determinó el tipo de curva flujo-velocidad que se usó. Los otros dos se emplearon para presentar resultados en algunos arcos específicos.

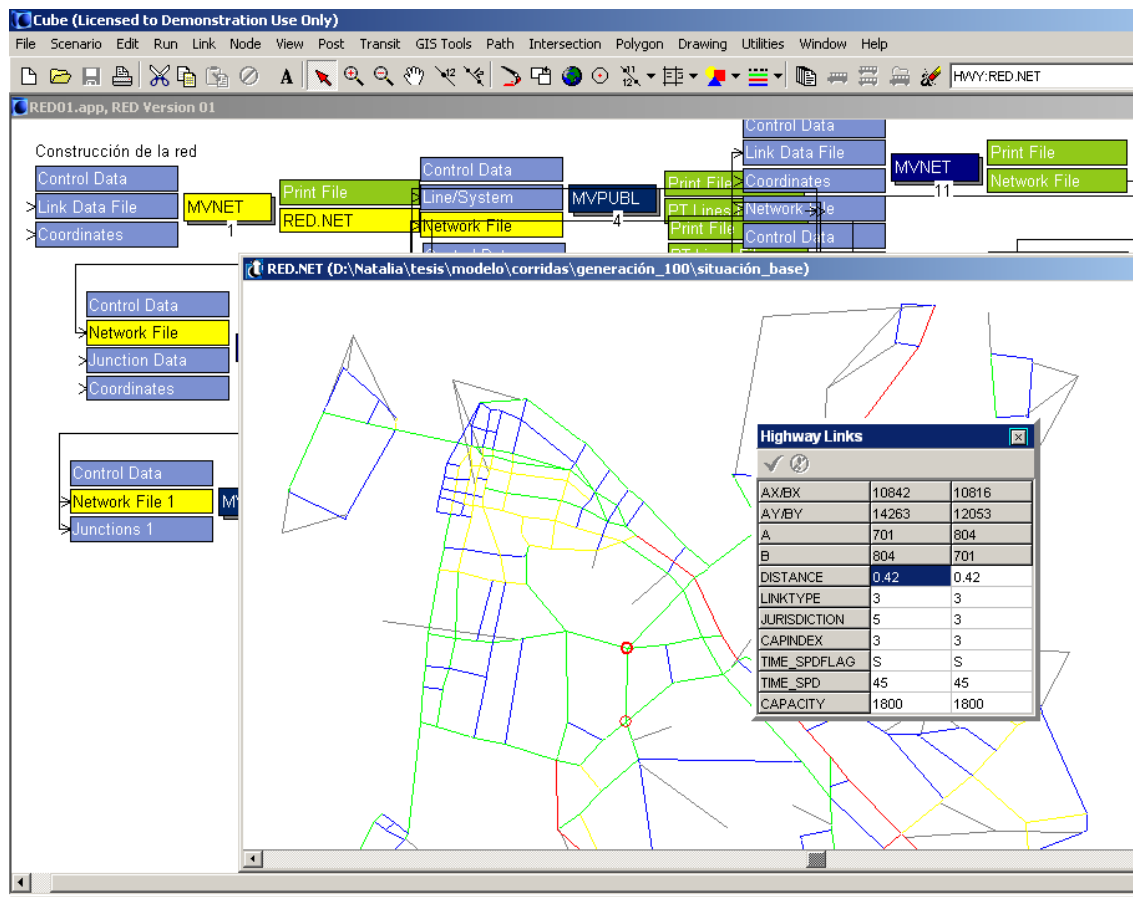


Figura 3. Creación de la red (pantalla de TRIPS)

Fuente: Elaboración propia

También se definió la regulación de las intersecciones. Primero se eligió el tipo de regulación y en función de esto se definieron los otros parámetros, como prioridad de las vías (intersecciones de prioridad), o tiempo de ciclo y verde (intersecciones semaforizadas).

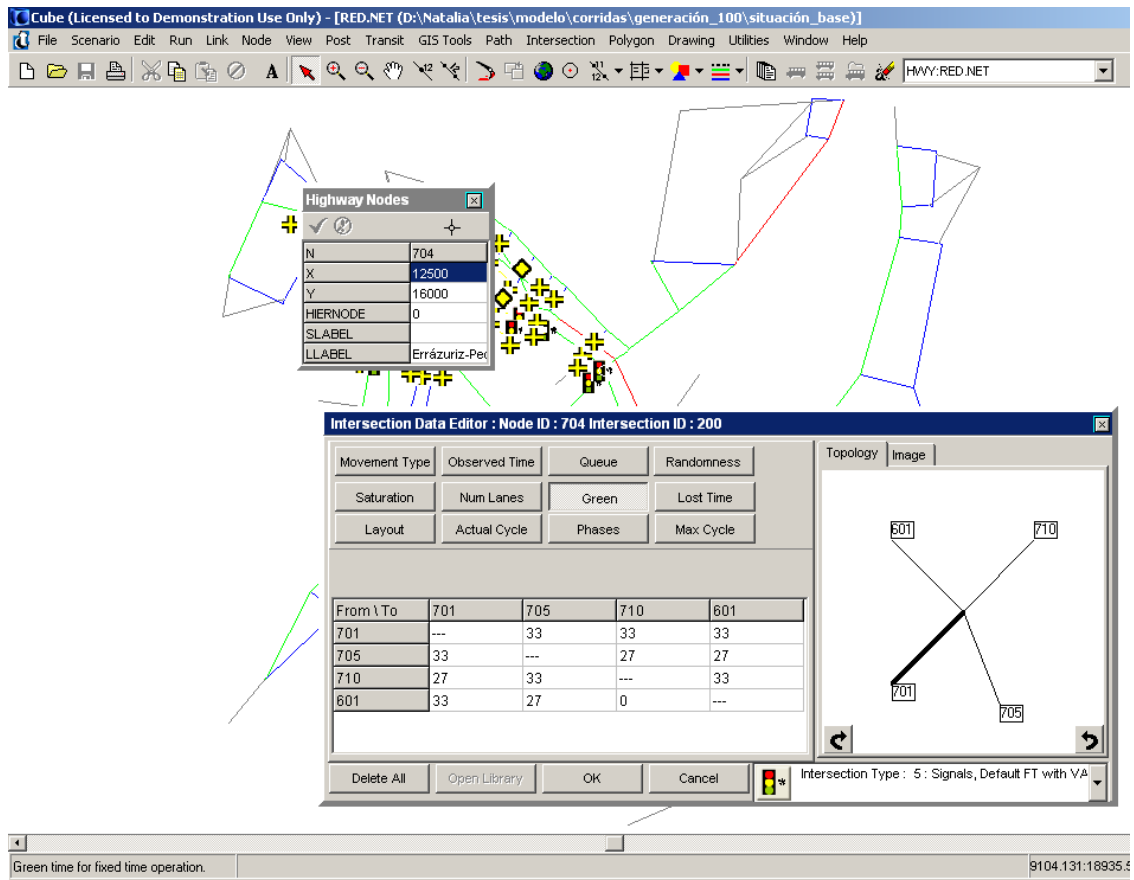


Figura 4. Definición de intersecciones (pantalla de TRIPS)

Fuente: Elaboración propia

Por último, en la preparación de las redes fue necesario definir las líneas de transporte público y sus atributos; algunos de los más relevantes fueron: el modo, la tarifa, la frecuencia y la secuencia de nodos que define la ruta en la red.

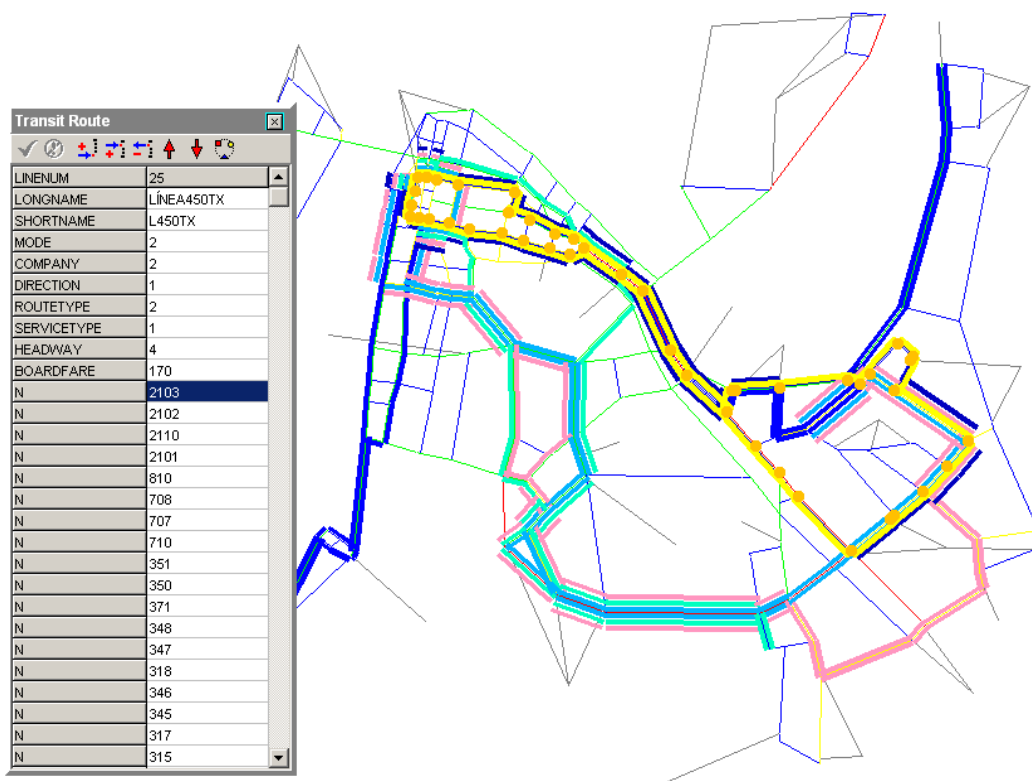


Figura 5. Definición de líneas de transporte público (pantalla de TRIPS)

Fuente: Elaboración propia

En el grupo Genera, donde se crean los vectores de generación y atracción de viajes, los vectores de viaje no varían con distintas situaciones de red, y por lo tanto, no dependen de otros resultados del modelo. El modelo usado no es sensible al costo del viaje, sólo depende de la cantidad de hogares y de las superficies dedicadas a las distintas actividades. En el grupo Genera se confeccionaron los vectores origen-destino, a través de varias manipulaciones y se dejó como resultado los vectores en el lenguaje de TRIPS.

En el grupo Distri se ingresan los vectores del grupo Genera y se realiza la distribución para cada propósito y categoría de nivel de ingreso y motorización. El subprograma de distribución tiene como información de entrada un vector origen-destino, la matriz de costos y el parámetro calibrado para cada propósito y categoría. En la siguiente pantalla del programa se muestra el subprograma de distribución, el vector origen-destino y la matriz de costo. El parámetro calibrado se codificó dentro de los datos de control (control data).

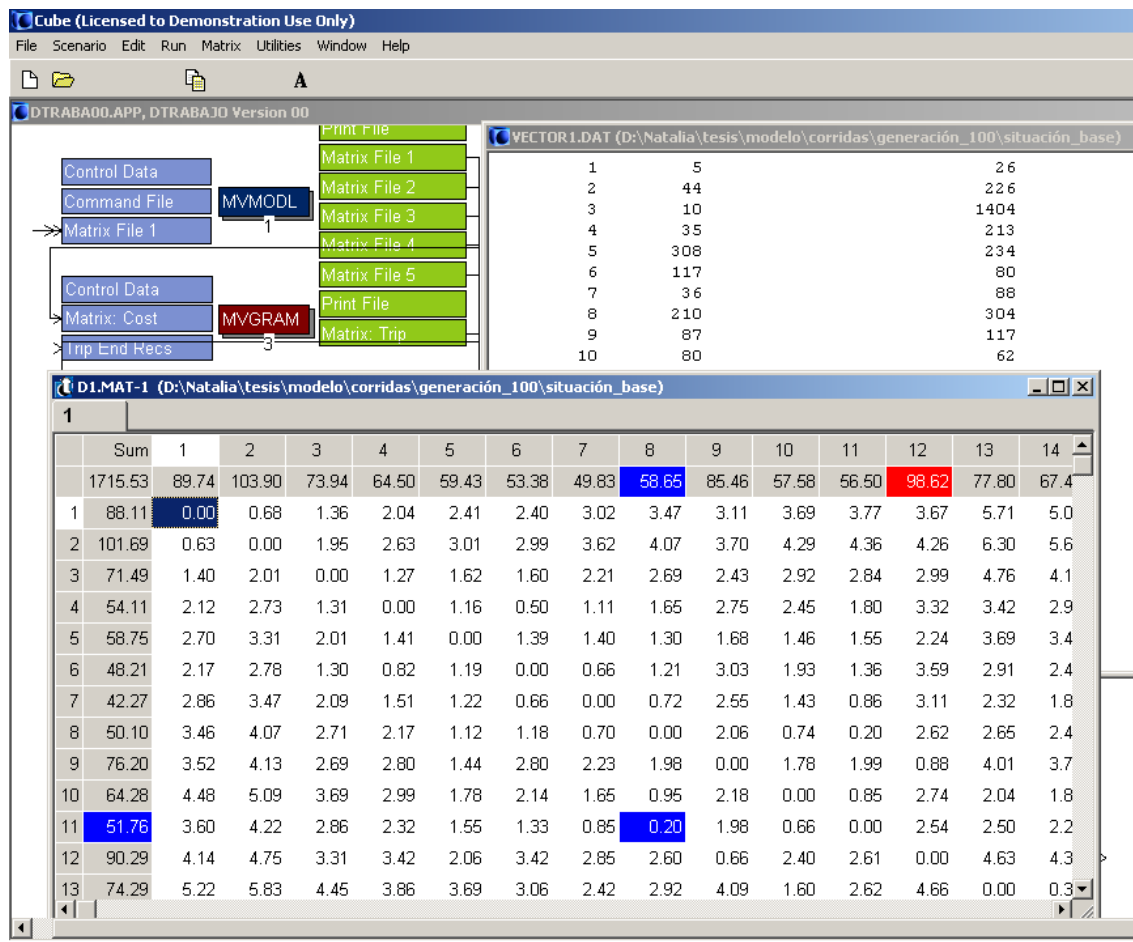


Figura 6. Subprograma de distribución (pantalla de TRIPS)

Fuente: Elaboración propia

Para realizar la partición modal se usa un subprograma que permite realizar manipulación de matrices y tiene además programados, distintos modelos de partición modal. En este caso se usó un *logit* jerárquico y los datos de entrada usados fueron la matriz de viajes y las matrices de costo por modo, propósito y categoría. A continuación, se presenta parte de la programación para uno de los subprogramas, con la programación del *logit* jerárquico.

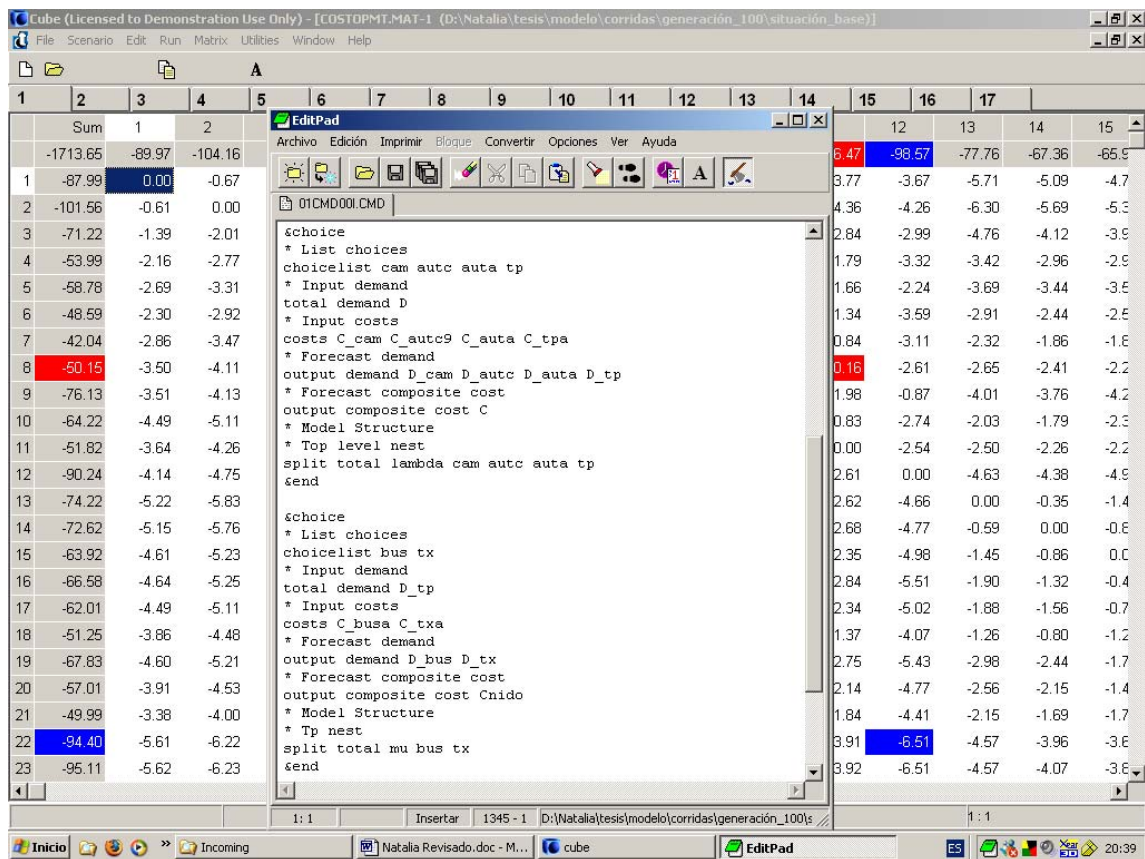


Figura 7. Programación de subprograma de partición modal (pantalla de TRIPS)

Fuente: Elaboración propia

En el subprograma de asignación usado para los vehículos privados se deben definir: el tipo de red (*inner* o *buffer*); las curvas flujo velocidad según el tipo de arco; la matriz a asignar; el tipo de método de asignación y sus parámetros asociados; y los tipos de reportes y matrices de costos resultantes. Para este caso se usó una red *inner* y un método de asignación Dial.

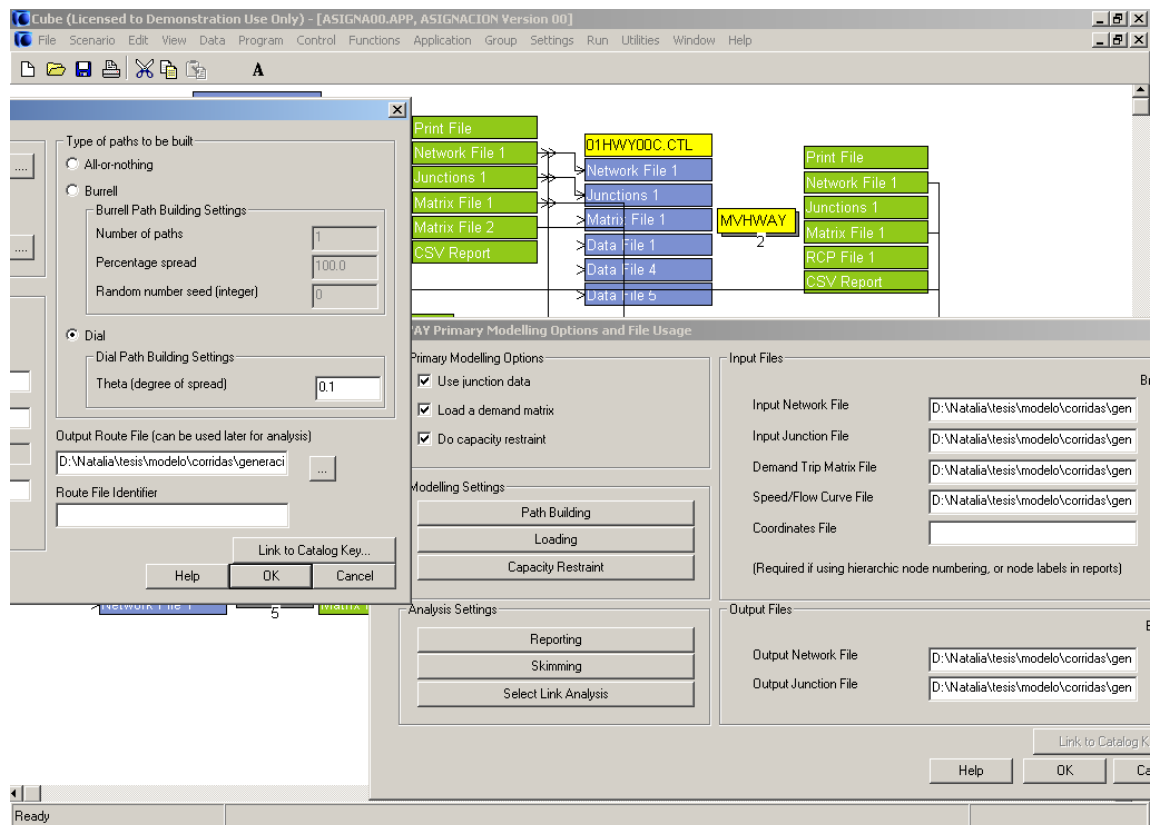


Figura 8. Datos de control del subprograma de asignación (pantalla de TRIPS)

Fuente: Elaboración propia

4 DESCRIPCIÓN DE LA INFORMACIÓN USADA

A continuación, se presenta en detalle la información que se usó para construir el modelo en TRIPS. Se hace una descripción de la red; se presentan los modelos de demanda usados; se describe el modelo de asignación, y por último, se presenta un breve diagnóstico de la situación que se eligió como base.

La información base que se usó para el desarrollo de los experimentos se obtuvo del estudio de CIS (1998b). Uno de los objetivos de este estudio fue calibrar un modelo clásico de transporte, para la situación actual al año del desarrollo del estudio, 1998, y el modelo calibrado fue usado en Vivaldi. La información usada se encuentra en la memoria y anexos del informe, de público acceso, a través de la biblioteca de la SECTRA.

Para el desarrollo de los experimentos, se usó la siguiente información específica:

- Zonificación
- Información socioeconómica
- Información de la red de modelación
- Modelos de demanda calibrados

En el estudio base se definió una zonificación de 37 zonas. Esta zonificación fue definida a través de criterios como accesibilidad y densidad donde se busca cierta homogeneidad al interior de la zona. Por limitaciones de la herramienta de modelación escogida (se utilizó la versión demo, que es totalmente funcional con un máximo de 25 zonas), se debió hacer una rezonificación, agrupando estas 37 zonas en 25.

Los periodos de modelación están definidos como punta mañana y fuera de punta, aunque para los experimentos sólo se usa la información de la punta mañana. El horario de este periodo es 7:45 a 8:45 en día laboral.

Los modos modelados se eligieron como los más representativos dentro del sistema de transporte de la ciudad, y entre los elegidos se logra representar el 90% de los viajes en la ciudad. Para los experimentos se usaron los mismos modos, estos son:

- Caminata
- Auto chofer
- Auto acompañante
- Bus
- Taxi colectivo

Se hizo una categorización de los usuarios por nivel de ingreso y tasa de motorización, ambas variables del hogar del que proviene el usuario. Se consideraron 3 niveles de ingreso: bajo, medio y alto; y 3 categorías de tasa de motorización: sin auto, con un auto y con 2 o más autos. Con esto se llegó a una estratificación de la demanda de 9 categorías de hogares como producto del cruce de los niveles de ingreso y de motorización. Para el desarrollo de los experimentos se mantuvo la misma categorización.

Los viajes fueron divididos por el propósito en viajes al trabajo, al estudio u otros propósitos. En la punta mañana, periodo que fue modelado en los experimentos, el propósito “otros” tiene muy poca relevancia en el total de viajes de la ciudad, por lo cual se optó por no incluirlo y de esa forma centrar el análisis sobre los propósitos más representativos del periodo.

4.1 RED DE MODELACIÓN

La red de modelación es un grafo dirigido, compuesto por nodos y arcos. Toda la información usada para la codificación de la red se obtuvo del informe final y anexos de CIS (1998b). Para este modelo se mantuvo la misma red:

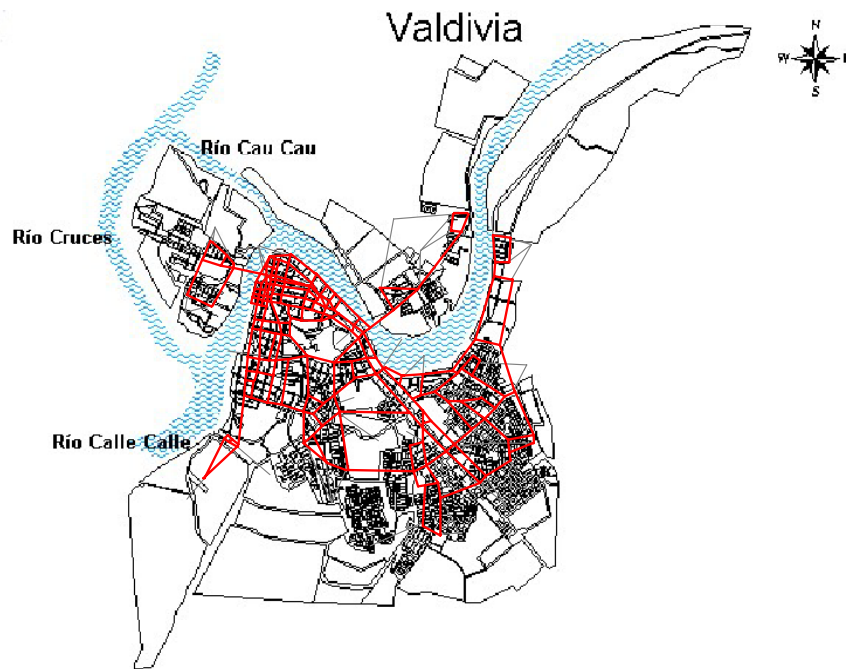


Figura 9. Red de Modelación

Fuente: CIS (1998b)

En el área de la ciudad donde se concentran las intersecciones semaforizadas y donde la red de modelación es más densa, se decidió incorporar la información de intersecciones; mientras que el resto de la red quedó definida como *buffer*. Con tal información, los nodos quedan completamente caracterizados como intersecciones, teniendo en cuenta el tipo de regulación, la cantidad de pistas y uso de estas, los flujos de saturación, los tiempos de ciclo, verde y entreverde de los semáforos. Las intersecciones semaforizadas fueron caracterizadas como intersecciones actuadas, para que el programa pueda acomodar los tiempos de ciclo y verde según el flujo finalmente asignado.

En las siguientes figuras se puede apreciar distintas características de la definición de la red.

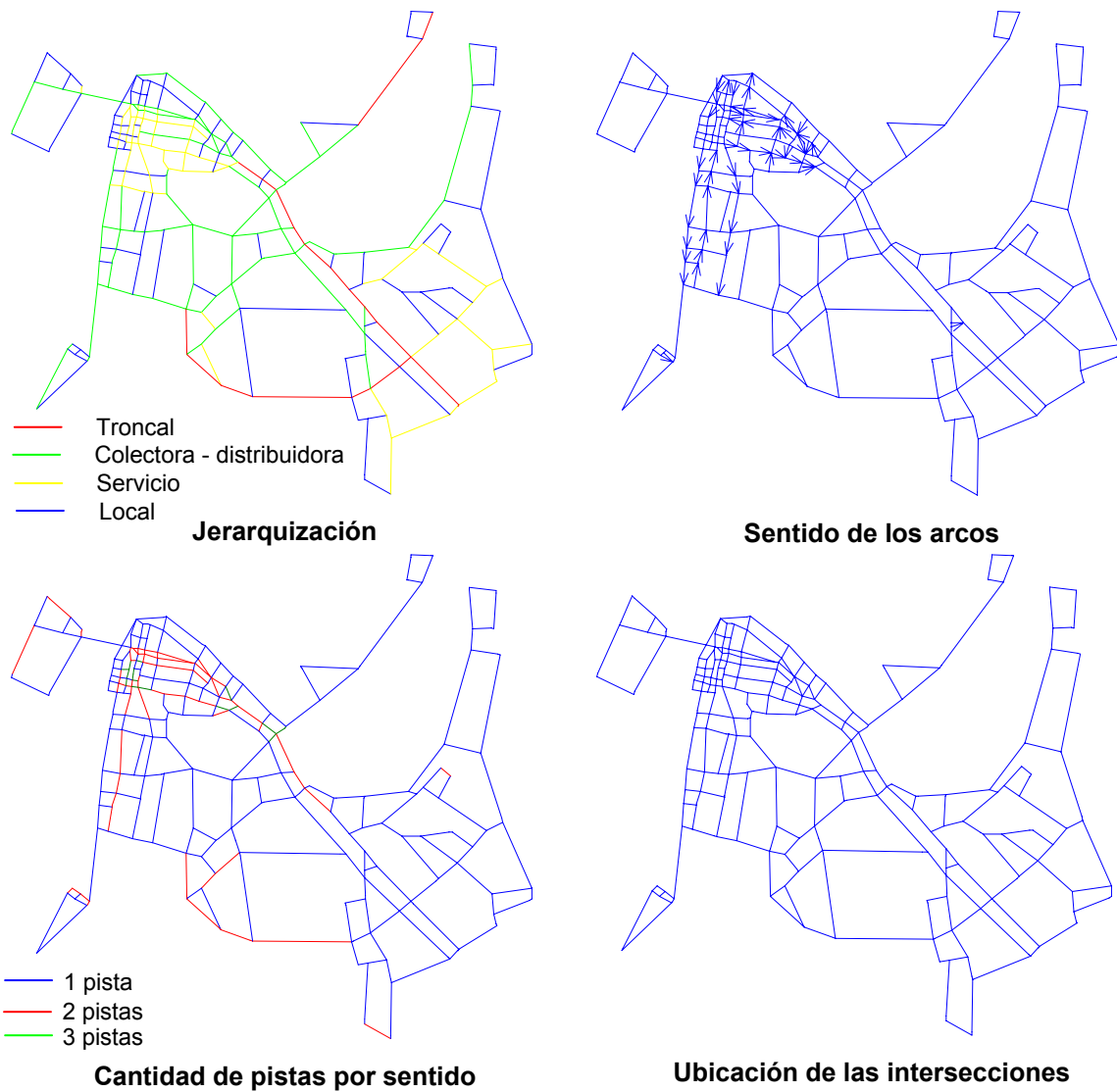


Figura 10. Características de la red de modelación

Fuente: Elaboración propia

Las líneas de transporte público se codificaron incluyendo información sobre el tipo de vehículo (taxibuses y taxis colectivos), la tarifa y la frecuencia. En las siguientes figuras se muestran las líneas separadas por tipo de vehículo.

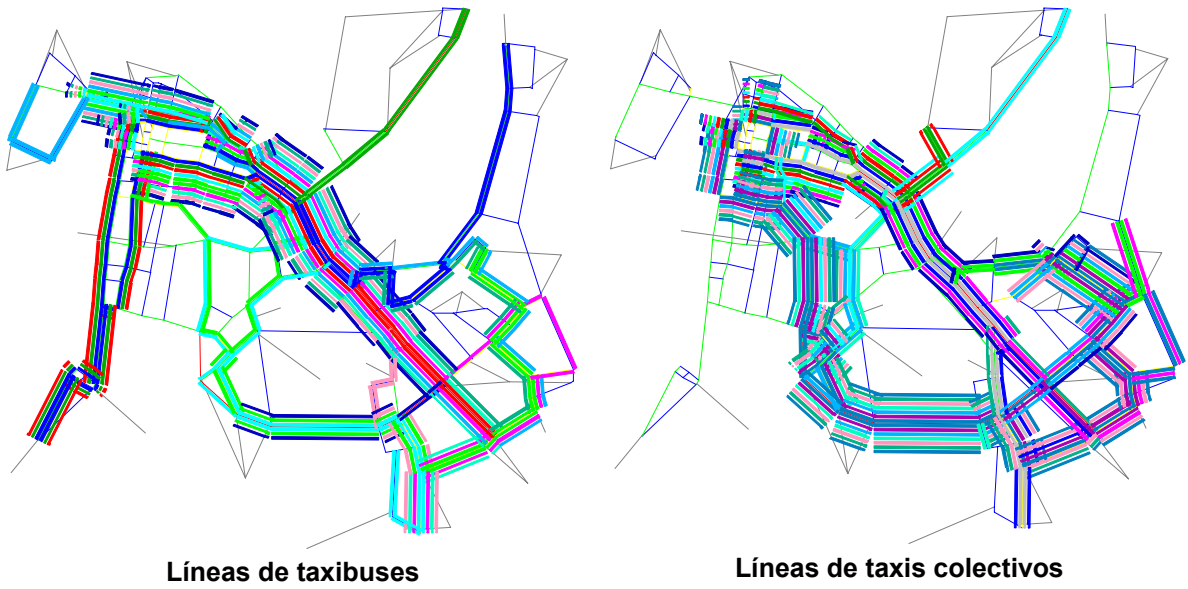


Figura 11. Líneas de transporte público

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente figura se muestran algunos nombres de las calles que representan los arcos, estos mismos nombres servirán de referencia a lo largo de todo el documento.



Figura 12. Nombres de algunas calles relevantes

Fuente: Elaboración propia

4.2 MODELOS DE DEMANDA

La información socioeconómica es básicamente información sobre los usos de suelo y la cantidad de hogares, por tipo en cada zona. Toda esta información se usa para alimentar los modelos de demanda, principalmente, el modelo de generación y atracción de viajes.

Dentro de la información usada, se halla la información socioeconómica obtenida en el estudio base y los modelos de demanda calibrados. Estos son los modelos de generación y atracción, de distribución y de partición modal de los viajes. Y se exponen a continuación:

4.2.1 Modelos de generación y atracción de viajes

Para explicar la generación y atracción de viajes en la información base (CIS, 1998b) se hace una diferencia entre los tipos de viajes, llegando a tres categorías:

- **Viajes basados en el hogar ida (BHI):** Viajes con origen en el hogar.
- **Viajes basados en el hogar retorno (BHR):** Viajes con destino al hogar.
- **Viajes no basados en el hogar (NBH):** Viajes con origen y destino distintos del hogar.

Los modelos calibrados por CIS (1998b) para calcular los vectores de generación y atracción de viajes son la regresión lineal múltiple y el análisis de clasificación múltiple. Estos dos modelos se usan para explicar distintos tipos de viaje, por ejemplo la regresión lineal múltiple explica los NBH, mientras el análisis de clasificación múltiple se usa para los BHI o los BHR. En el periodo punta mañana la generación de los viajes se explica por entero con los viajes BHI, mientras que los viajes atraídos son NBH. A continuación, se hace una breve reseña de ambos tipos de modelos.

a) Regresión lineal múltiple (RML)

Intenta establecer una relación funcional entre el número de viajes producidos o atraídos de un cierto tipo en una zona (por ejemplo, viajes BHI atraídos en la Punta Mañana con propósito Trabajo) y los diferentes usos de suelo de ésta. La forma funcional está representada por:

$$V_i = \alpha_1 x_i^1 + \alpha_2 x_i^2 + \dots + \alpha_M x_i^M \quad (5.)$$

donde:

V_i = viajes modelados
 x_i^k = variables de uso de suelo que caracterizan la zona i, como por ejemplo la superficie dedicada al comercio o el número de matriculas en un nivel de educación.

Habitualmente, el modelo es lineal en los parámetros, los cuales, en el caso de la generación, están diferenciados por categoría de usuario. Además, el criterio de calibración más usado es el de mínimos cuadrados.

b) Análisis de clasificación múltiple (ACM):

Este método incorpora un procedimiento estadístico para seleccionar variables y definir clases, y probar las clasificaciones cruzadas resultantes (Ortúzar, 1998).

Se considera un modelo con una variable dependiente continua, la tasa de generación, dos variables independientes discretas, la tasa de motorización y el ingreso familiar, y una muestra de hogares. La forma general de este modelo es:

$$V_i^n = T^n * H_i^n \quad (6.)$$

donde:

V_i^n = es el número de viajes de un cierto tipo generados por (o atraídos a) la zona i por los hogares de tipo n (por ejemplo, viajes generados BHI en la Punta Mañana con propósito Estudio).

T^n = tasa de viajes por hogar que depende de las características socioeconómicas del hogar, pero no de la zona.

H_i^n = población expresada en hogares tipo n en la zona i .

La media de la variable dependiente se puede estimar tanto para la muestra completa de hogares como para cada fila y columna de la matriz de clasificación cruzada; a su vez, cada una de estas últimas, pueden expresarse como desviaciones de la media global. Por lo tanto, se puede estimar el valor de la variable dependiente para cada celda de la matriz, añadiendo a la media global las desviaciones correspondientes por celdas y columnas.

La representación analítica del método ACM tiene la siguiente forma:

$$T^{n(I,M)} = T + (T^I - T) + (T^M - T) \quad (7.)$$

donde:

T = promedio global de las observaciones (tasa de generación de viajes para todos los hogares).

T^I = promedio de la variable dependiente respecto nivel de estratificación I , según variable explicativa ingreso

T^M = promedio de la variable dependiente respecto al nivel de estratificación M , según variable explicativa tasa de motorización.

$T^{n(I,M)}$ = valor ACM predicho para la variable tasa de viajes del hogar tipo n , el cual está definido por el cruce de las categorías de ingreso I y de motorización M .

A continuación, se presentan los modelos finalmente usados en el desarrollo de los experimentos. Los cuales fueron obtenidos por CIS (1998b). Los viajes generados en el período de modelación son basados en el hogar, por lo cual para su estimación se usó el ACM obteniendo para los propósitos trabajo y estudio, los siguientes resultados:

Tabla 10. Tasas de generación de viajes (viajes/hogar) Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Trabajo

Hogares	Observadas			Modeladas		
	Sin Auto	Con 1 Auto	Con 2 o más Autos	Sin Auto	Con 1 Auto	Con 2 o más Autos
Ingreso Bajo	0,371	0,431	0,6	0,318	0,53	0,624
Ingreso Medio	0,445	0,608	0,941	0,454	0,666	0,76
Ingreso Alto	0,25	0,781	0,605	0,607	0,819	0,912

Fuente: CIS, 1998

Para analizar la bondad de ajuste del modelo ACM se estimó por mínimos cuadrados el siguiente modelo:

$$VO_{in} = a_0 + a_1 * V_{in} \quad (8.)$$

donde:

VO_{in} = número de viajes observados producidos en la zona i por los hogares de la categoría n.

a_0, a_1 = parámetros por calibrar

V_{in} = número de viajes modelados producidos en la zona i por los hogares de la categoría n.

Por lo tanto, en la medida que el r^2 de esta ecuación y las estimaciones de a_0 y a_1 estén más próximas a 1, 0 y 1, respectivamente, el modelo ACM presentará un mejor ajuste.

Tabla 11. Ajuste del modelo de generación de viajes zonales por categoría de usuario Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Trabajo

Parámetro	Estimación	Desv. Estándar	t - Student
a0	1,767	1,422	1,243
a1	1,016	0,0378	26,90

R Cuadrado Corregido: 0,8309

Tabla 12. Tasas de generación de viajes (viajes/hogar) Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Estudio

Hogares	Observadas			Modeladas		
	Sin Auto	Con 1 Auto	Con 2 o más Autos	Sin Auto	Con 1 Auto	Con 2 o más Autos
Ingreso Bajo	0,48	0,508	0,2	0,438	0,562	0,792
Ingreso Medio	0,575	0,667	1,235	0,583	0,708	0,938
Ingreso Alto	0,5	0,688	0,789	0,659	0,783	1,01

Fuente: CIS, 1998

Tabla 13. Ajuste del modelo de generación de viajes zonales por categoría de usuario Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Estudio

Parámetro	Estimación	Desv. Estándar	t - Student
a0	-2,849	3,992	-0,713
a1	1,199	0,0962	12,45

R Cuadrado Corregido: 0,8651

Fuente: CIS, 1998

Los ajustes que presentan los ACM para las tasas de generación, tanto para el propósito trabajo como para estudio, son buenos teniendo un r^2 mayor a 0,8 en los dos casos. Los parámetros de ajuste a_0 en ambos casos tienen un t - Student bajo, por lo cual se debería haber recalibrado el modelo eliminando este parámetro. De todas formas el parámetro a_0 en ambos casos es pequeño, en comparación a la magnitud de los viajes por zona y el a_1 es cercano a 1, aunque para el propósito estudio es más cercano a 1,2 con lo que se puede pensar que se están subestimando la cantidad de viajes en un 20%.

La atracción de viajes en el período punta mañana está asociada a actividades económicas o educativas, por eso la forma de estimar estos viajes se hace usando una RLM. En consecuencia, CIS (1998b) formuló el siguiente modelo para los viajes atraídos:

$$V_i^{tp} = \alpha^{tp} + \sum_k \beta^{tpk} * \text{sup_}c_i^k \quad \forall t, p \quad (9.)$$

donde:

V_i^{tp} = número de viajes atraídos por la zona i , en el período t y con propósito p .
 α^{tp}, β^{tp} = parámetros diferenciados por período t , propósito p y tipo de uso de suelo k .
 $\text{sup_}c_i^k$ = superficie de construcción de uso k en la zona i .

Los usos considerados son:

- Comercio
- Industria: Industria y Minería
- Servicio: Administración Pública y Defensa más Oficinas
- Educación
- Salud
- Otro: Deporte-recreación, Hotel, Motel, Culto, Transporte y Telecomunicaciones

Para la atracción de viaje en punta mañana con el propósito trabajo, el modelo calibrado es el siguiente:

$$V_i^T = a01 + a11*\text{supc_com}_i + a21*\text{supc_ind}_i + a31*\text{supc_edu}_i \quad (10.)$$

donde:

V_i^T = Viajes atraídos en la punta mañana, propósito trabajo, en la zona i
 $a01, a11, a21$ y $a31$ = parámetros calibrados para punta mañana propósito trabajo, asociados a los diferentes usos de suelo y constante.
 supc_com_i = Superficie dedicada al comercio en la zona i
 supc_ind_i = Superficie dedicada a la industria en la zona i
 supc_edu_i = Superficie dedicada a la educación en la zona i

Tabla 14. Modelo de Atracción de viajes zonales totales Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Trabajo

Parámetro	Estimación	Desv. Estándar	t - Student
a01	78,31956	39,21676	1,99709
a11	0,036531	0,001565	23,348311
a21	0,004757	0,002434	1,95423
a31	0,015314	0,006905	2,217664

R Cuadrado Corregido: 0,8652
Fuente: CIS, 1998

El ajuste de este modelo es bueno, sin embargo, el parámetro a21 asociado a la superficie dedicada a la industria no tiene un buen t – Student y el parámetro es aproximadamente 10 veces menor que los demás asociados a superficie. Se podría haber calibrado un modelo sin este parámetro.

Para la atracción de viaje en punta mañana con el propósito estudio, el modelo calibrado es el siguiente:

$$V_i^E = a12 * ma_preb_i + a12 * ma_basi_i + a12 * ma_medi_i + a22 * ma_univ_i \quad (11.)$$

donde

V_i^E = Viajes atraídos en la punta mañana, propósito estudio, en la zona i
a12 y a22 = parámetros calibrados para punta mañana propósito estudio, asociados al número de matrículas en los distintos niveles de educación.

ma_preb_i = Número de matrículas en nivel de enseñanza prebásica, en la zona i

ma_basi_i = Número de matrículas en nivel de enseñanza básica (sin adultos), en la zona i

ma_medi_i = Número de matrículas en nivel de enseñanza media (sin adultos), en la zona i

ma_univ_i = Número de matrículas en nivel de enseñanza universitaria, en la zona i

Tabla 15. Modelo de Atracción de viajes zonales totales Período: Punta Mañana, Tipo: BHI y Propósito: Estudio

Parámetro	Estimación	Desv. Estándar	t - Student
a12	0,60909	0,12581	4,84120
a22	0,317754	0,012029	2,641582

R Cuadrado Corregido: 0,7537

Fuente: CIS, 1998

Si bien el R Cuadrado de este modelo no es mayor a 0,8, sigue siendo un valor aceptable. En este modelo se puede destacar la ausencia de constante, es decir, que todos los viajes se están explicando a partir de las matrículas.

Dentro de las variables explicativas, en los modelos de generación y atracción de viajes presentados, no encontramos ninguna, que dependa de las variaciones en los tiempos de viaje, rutas, o costos asociados al viaje, por lo cual, no será posible observar modificaciones en esta etapa en los experimentos.

4.2.2 Modelo de distribución

En CIS (1998b) se definió para cada combinación período-propósito un modelo de distribución del tipo gravitacional, doblemente restringido, basado en el principio de maximización de la entropía.

Las restricciones del problema quedaron dadas por los viajes originados por zona, los cuales fueron definidos a nivel de categorías de usuarios ya que dependen principalmente de las características de los hogares que producen estos viajes, lo cual fue captado para efectos de su calibración por la EOD de hogares, base del estudio.

Por otra parte, la segunda restricción del problema quedó dada por los destinos o viajes atraídos por zona. Estos no pudieron ser modelados a nivel de categorías de usuarios dada las características de las variables que los explican, principalmente variables de uso de suelo del tipo educación, salud, comercio, etc., muy difíciles de obtener a nivel de tipos de usuarios.

Con estas consideraciones, la especificación del modelo de distribución de viajes planteada por CIS (1998b) es:

$$T_{ijn} = O_{in} A_{in} D_j B_j \exp(-\beta^n L_{ijn}) \quad (12.)$$

s.a.

$$\sum_j T_{ijn} = O_{in}, \forall i$$

$$\sum_i T_{ijn} = D_j, \forall j$$

donde:

T_{ijn} = Viajes desde el origen i al destino j , para el estrato socioeconómico n (propósito p y período k implícitos).

O_{in} = Viajes originados en la zona i por el estrato socioeconómico n

D_j = Viajes atraídos en la zona j

A_{in} = Factor de balance asociado al origen i y al estrato socioeconómico n

B_j = Factor de balance asociado al destino j

β^n = Parámetro a calibrar del modelo para el estrato socioeconómico n (propósito p y período k implícitos).

L_{ijn} = Costo compuesto (Logsuma) de transporte desde el origen i al destino j , obtenido como el logaritmo natural de la suma de los exponentes de costos modales, para el estrato socioeconómico n .

Se consideró un modelo clásico de transporte del tipo secuencial a nivel de las etapas que lo conforman, en el cual la etapa de distribución (¿A dónde viajar?) sea anterior a la etapa de partición modal (¿En qué viajar?), por lo cual la expresión para los costos compuestos o logsuma es tal que

$$L_{ijn} = -\ln\left(\sum_{m \in M} \exp(-C_{ijnm})\right) \quad (13.)$$

C_{ijnm} representa al costo entre el par origen destino i - j para la categoría n en el modo m perteneciente al conjunto de modos disponibles M entre ese par i - j , obtenido de la especificación del modelo de partición modal a través de la suma de combinaciones de asociado a cada modo m , de la forma:

$$C_{ijnm} = -\left(\sum_k \theta_{mk} * X_{ijmk}\right) \quad (14.)$$

donde:

θ_{mk} = parámetro asociado a atributo k en el modo m

X_{ijmk} = valor del atributo k en el modo m entre el par origen destino i - j

Tabla 16. Parámetro β^n Calibrados por Propósito y Categoría, periodo punta mañana

Propósito	CATEGORIAS								
	Ingreso bajo			Ingreso medio			Ingreso alto		
	0 autos	1 auto	2+ autos	0 autos	1 auto	2+ autos	0 autos	1 auto	2+ autos
Trabajo	0,972	0,732	0,582	0,724	0,498	0,722	0,006	0,300	0,009
Estudio	1,209	0,814	0,076	0,634	0,567	0,400	1,887	0,087	0,060

Fuente: CIS, 1998.

4.2.3 Modelo de partición modal

En CIS (1998b) se calibraron varios modelos de elección modal del tipo *Logit*.

La probabilidad de elección de un modo i (P_i) en el modelo *Logit* Multinomial (MNL) es proporcional a la exponencial de la utilidad presentada por dicho modo (i) para el viajero y tiene la siguiente formulación:

$$P_i = \frac{\exp(\lambda u_i)}{\sum \exp(\lambda u_j)} \quad (15.)$$

$$u_i = c_i + \sum(\theta_i * X_i)$$

donde

- λ , parámetro de dispersión.
- u_i , función de utilidad del modo i
- X_i , atributos (variables de servicio y características del usuario)
- θ_i , parámetros de calibración
- c_i , constante modal específica del modo i
- u_j , funciones de utilidad de todos los modos de viaje que el viajero tiene disponible.

En este estudio (CIS, 1998b) se consideró un modelo de tipo jerárquico (J), con un nido de transporte público para reconocer las posibles correlaciones existentes entre las utilidades del taxi colectivo y del bus.

En este caso la probabilidad de escoger el modo bus es el producto de dos probabilidades independientes: primero, la de escoger transporte público y, luego, la correspondiente a elegir bus dado que ya se escogió transporte público:

$$P_{Bus} = P_{Tte. Púb} * P_{Bus/Tte. Pub} \quad (16.)$$

donde:

- $P_{Bus/Tte. Pub}$ = formulación del *Logit* presentado anteriormente
- $P_{Tte. Púb}$ = probabilidad de escoger el nido entre las elecciones de auto y caminata.

Esta probabilidad se calculó igualmente como un modelo de tipo *Logit*, pero primeramente se definió la utilidad del nido como:

$$U_{\text{nido}} = \varphi * EMU + \sum \theta_i * X_i \quad (17.)$$

donde:

$$EMU = \ln (\exp (u_{\text{Bus}}) + \exp (u_{\text{Taxi Colect.}}))$$

$$0 < \varphi < 1$$

y la sumatoria $\sum \theta_i * X_i$, considera todos los elementos comunes dejados fuera en la estimación MNL del nido.

Se reconoce que esta forma de calibración corresponde a una forma antigua, ya que el modelo fue calibrado en 1998, que genera un sesgo (Carrasco et al., 2001). Sin embargo, dado que esta es la información disponible, se decidió usar el modelo tal como está, pero teniendo en cuenta este sesgo al momento de analizar los resultados.

Dentro de esta formulación general se consideraron especificaciones alternativas de la utilidad, unas lineales en el costo del modo y otras lineales en el costo del modo dividido por Ingreso (ingreso mensual del hogar del viajante).

Tabla 17. Modelos de Partición Modal del período Punta Mañana

Atributos	Parámetros
Tiempo viaje propósito Trabajo valor t-Student	-0,1082 -9,9
Tiempo viaje propósito Estudio valor t-Student	-0,08851 -9,7
Tiempo de Espera valor t-Student	-0,3926 -3
Costo estrato Ingreso Bajo valor t-Student	-0,02 -6,4
Costo estrato Ingreso Medio valor t-Student	-0,02059 -6,8
Costo estrato Ingreso Alto valor t-Student	-0,01782 -5,2
Constante modal Auto Acompañante valor t-Student	-1,535 -5,9
Constante modal Taxi Colectivo valor t-Student	-1,277 -6,7
Motorización valor t-Student	1,023 5
Theta valor t-Student	0,6743 8,9
R Cuadrado	0,2345

Fuente: CIS, 1998

Tabla 18. Valores Subjetivos del Tiempo de Viaje del período Punta Mañana

Categoría de ingreso y propósito de viaje	Valor subjetivo del tiempo \$/min
Ingreso Bajo propósito Trabajo	5,4
Ingreso Medio propósito Trabajo	5,3
Ingreso Alto propósito Trabajo	6,1
Ingreso Bajo propósito Estudio	4,4
Ingreso Medio propósito Estudio	4,3
Ingreso Alto propósito Estudio	5

Fuente: CIS, 1998

Al analizar los ajustes del modelo de CIS se puede ver que si bien el R Cuadrado es bajo, en estos modelos normalmente no se logran ajustes mucho mejores. Revisando los parámetros se ve los asociados al costo son bastante parecidos y se podría haber intentado calibrar un modelo sin distinción de estratos, o al menos uniendo los estratos bajo y medio. De esta forma, se evitaría esa pequeña disminución del valor subjetivo del tiempo entre el estrato bajo y el medio. También cabe destacar que sólo resultaron estadísticamente significativas dos constante modales, lo que mejora las predicciones.

4.3 MODELO DE ASIGNACIÓN

El objetivo de la etapa de asignación es obtener la carga de flujo en los arcos de la red. Para realizar esto, primero se cargaron los flujos de transporte público, dado que son flujos que usan rutas fijas, dadas por las líneas de los dos modos. Para esta primera carga se consideró asignar los flujos en unidades de vehículos equivalentes, ya que en estas unidades están expresadas las capacidades de los arcos. Con estos flujos en la red se puede asignar los viajes en el modo auto chofer, donde cada viaje se asimila a un vehículo.

Para realizar la asignación del transporte público, se tuvo en cuenta la restricción de capacidad; es decir, que el tiempo de viaje en un arco depende de la cantidad de flujo circulando por ese mismo arco. Para realizar este cálculo de tiempo de viaje, cada arco tiene asociado una curva que relaciona el flujo y la velocidad.

El algoritmo de elección de rutas para los viajes que se usó es del tipo Dial. Este algoritmo considera un modelo estocástico basado en el modelo *logit*, para calcular la probabilidad de elección de ruta. La ecuación para el cálculo de esta probabilidad es la siguiente:

$$P(r) = \frac{1}{1 + e^{-\theta(c_* - c_r)}} \quad (18.)$$

donde:

- P(r) = probabilidad de elección de la ruta r
- c_* = costo en la ruta de costo mínimo
- c_r = costo en la ruta alternativa r
- θ = parámetro de dispersión de Dial

El costo que se usa en la elección de la ruta corresponde al tiempo de viaje.

4.4 SITUACIÓN BASE

Para construir la situación base se usó la información antes descrita, pero se incorporaron pequeños cambios en la red para homogeneizar las vías donde se van a aplicar medidas, por ejemplo eliminando la variación en la cantidad de pistas por sentido.

Con esta situación modelada se obtuvieron los resultados base, respecto a los cuales se hicieron las comparaciones con los experimentos. A continuación, se presentan los principales resultados a modo de diagnóstico:

El total de viajes generados en la punta mañana, periodo modelado, asciende a 29.814. De estos, el 27,9% tienen como destino la zona centro de la ciudad, siendo la zona sur-oriente la que genera mayoritariamente dichos viajes (un 9,7%) por ser zona residencial. En la siguiente figura se muestra la generación y atracción de todas las zonas.

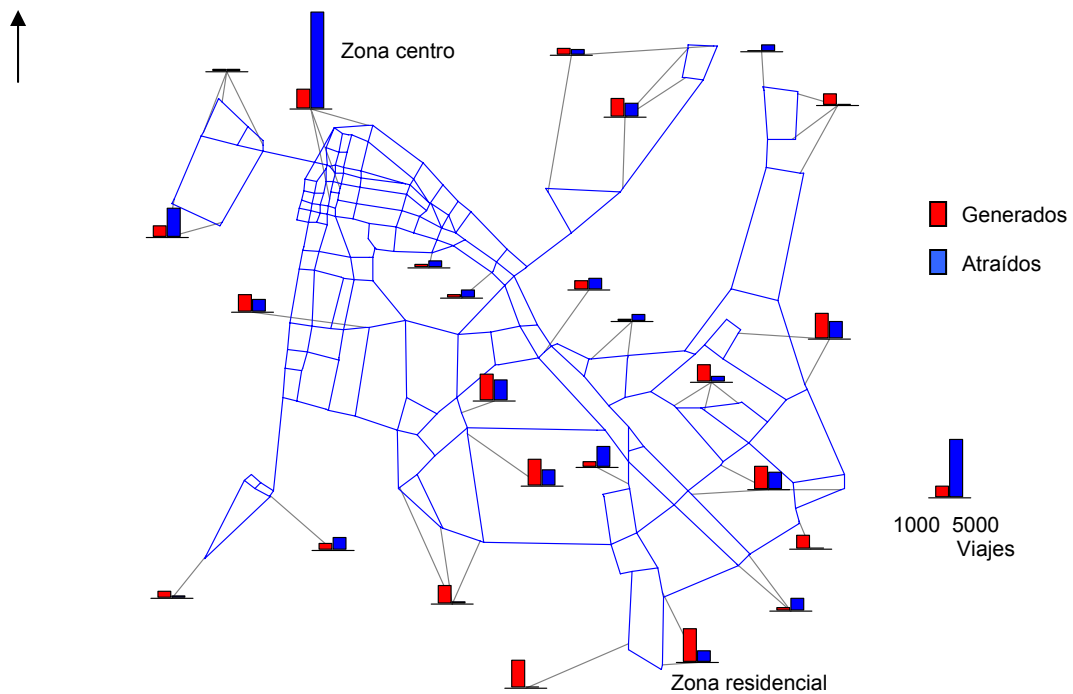


Figura 13. Viajes generados y atraídos en cada zona

Fuente: Elaboración propia

En general la distribución de viajes se comporta como lo esperado en ciudades de tamaño medio, con algunos focos generadores de la mayoría de los viajes (zonas dormitorio) y una distribución más o menos homogénea en toda la ciudad, salvo la zona céntrica, que es el principal foco atractor. Dentro de las zonas dormitorio es relevante destacar las zonas de la parte sur-oriente, que cada una genera entre un 5% a 7% del total de los viajes.

Respecto de la partición modal, el análisis se realizó globalmente y considerando sólo el mercado correspondiente a la zona céntrica de la ciudad, que es donde se analizaron posteriormente las medidas de gestión a implementar.

Considerando toda la ciudad, el modo predominante corresponde al bus, el cual sumado al modo taxi colectivo, sobrepasaron el 40% de participación. Destaca el modo caminata con más de un 30% de participación y los modos auto-chofer y auto-acompañante se ubican en tercer lugar con una participación del 22,3%. En consecuencia, los modos más eficientes en el uso de la capacidad vial fueron los que presentaron mayor participación del mercado de viajes a nivel global de la ciudad.

En el caso de los viajes desde el área céntrica, la partición modal es distinta, alcanzando un 38,7% los modos auto-chofer y auto-acompañante. El modo bus sumado al modo taxicolectivo, disminuyó su participación en más de un 10%, relegándose a último lugar el modo caminata.

En los viajes con destino el centro, la partición modal sufrió algunas variaciones respecto al total de la ciudad, bajó la caminata y subieron los modos privados, mientras que en los modos de transporte público, en total permaneció casi igual, pero bajó el bus y subió el taxi colectivo.

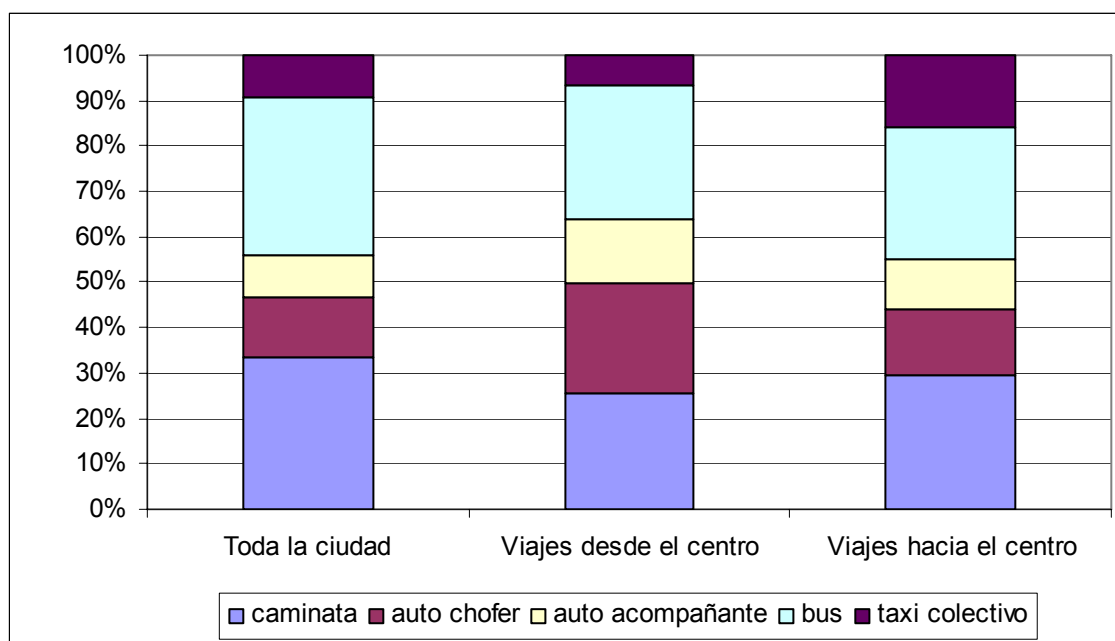


Figura 14. Partición modal, según área de análisis

Fuente: Elaboración propia

Observando la asignación de flujo sobre la red de la ciudad se puede ver que si bien hay algunas vías con mayor ocupación, en general no hay áreas que se vean congestionadas. Esto se puede reafirmar al revisar los grados de saturación, donde se encuentran sólo dos intersecciones con grados de saturación sobre 0,75, sin que siquiera estén cercanas. La vía que en la figura de la asignación se ve más cargada presenta grados de saturación, menores a 0,65. Con esto se puede ver que la situación base no presenta mayores problemas de congestión.

Se considera que la velocidad comercial en transporte público es buena cuando es superior a 20 km/h (Fernández, 1999), dado que realiza las paradas de transferencia de pasajeros. Revisando las velocidades del transporte público y privado en las distintas vías se ve que en general tienen buenos valores, en promedio 24,21 km/h para el transporte público y

37,07 km/h para el privado. Sí, se observa una diferencia importante entre las velocidades en algunas vías, donde la del transporte público llega a ser casi la mitad de la del privado. Esto se da especialmente en algunas calles del centro y en algunas de acceso al centro desde el sector sur-oriente.



Figura 15. Asignación de flujos a la red
Fuente: Elaboración propia

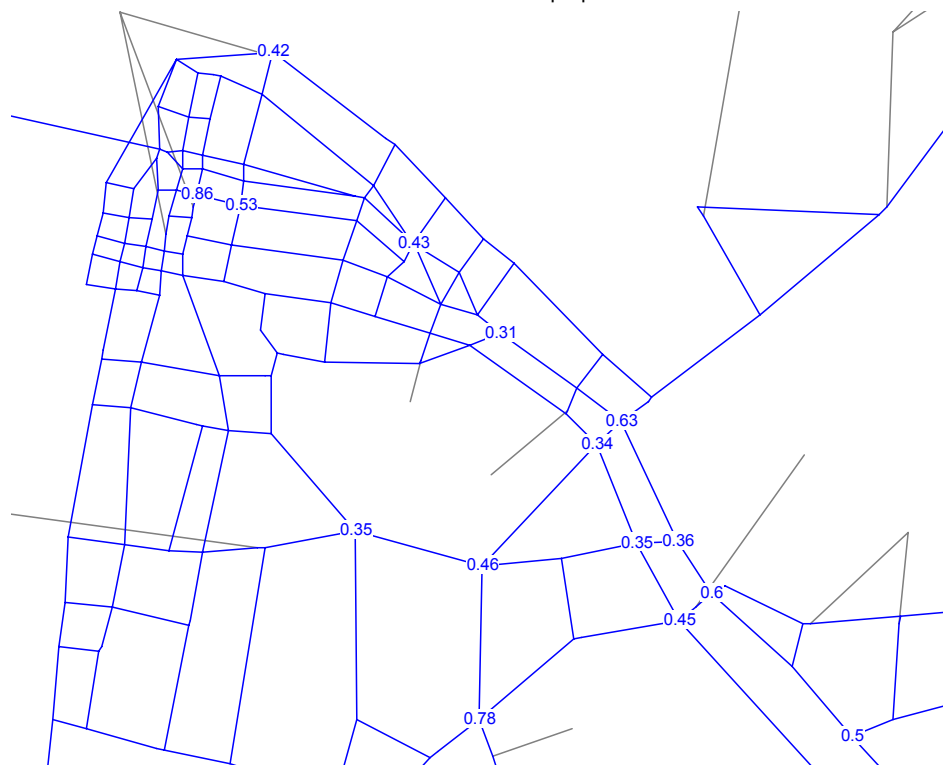


Figura 16. Grados de saturación de la red
Fuente: Elaboración propia

En la siguiente tabla se presentan, los valores promedios de las variables de servicio de los viajes en la ciudad. Se presentan los valores promedio del tiempo de viaje, el costo del viaje y el tiempo de viaje para cada modo.

Tabla 19. Variables de servicio promedio de la situación base

	Tiempo viaje (min)	Costo viaje (\$)	Tiempo espera (min)	Distancia de viaje (km)
auto chofer	5,147	55,9	0	3,17
auto acompañante	5,854	0	0	3,72
caminata	21,05	0	0	2,67
bus	5,962	140 / 50*	1,62	3,64
taxi colectivo	6,044	170	1,272	3,88

* Valores de tarifa adulto y estudiante

Fuente: Elaboración propia

En general el tiempo de viaje promedio fue bastante parecido, salvo para el modo caminata y estuvo de acuerdo con la distancia de viaje promedio. En el costo de viaje se ve que el costo del auto fue bastante bajo en comparación con las tarifas del bus y el taxi colectivo, aunque estuvo acorde, a la distancia y tiempo promedio de los viajes.

5 EXPERIMENTOS

Los experimentos consistieron en modelar medidas de gestión de tránsito en una red construida inicialmente con datos reales, modificando algunos parámetros para generar las condiciones que se quería estudiar.

Como se expuso anteriormente en el capítulo 3, la elección de las medidas desarrolladas en los experimentos se hizo por criterios de interés propio sobre algunas medidas, por las restricciones propias de la información disponible para la situación base y por restricciones de tiempo, para acotar el tema de investigación a desarrollar en una tesis de magíster. Se buscaron medidas que, de preferencia, se pudieran modelar sólo con cambios en la oferta de transporte (arcos, nodos, líneas de transporte público, costo generalizado), precisamente para ver el efecto de medidas puras de gestión de tránsito sobre la demanda.

Dentro de éstas, se optó por considerar las siguientes tres medidas, que cumplen tanto con el interés propio como con las restricciones de la información:

- Prioridad al transporte público
- Vías reversibles
- Tarifación vial en una zona

A continuación, se describen las medidas, en qué arcos o área se implementaron y las modificaciones que se hicieron, a la red o a los modelos en cada caso.

5.1 PRIORIDAD AL TRANSPORTE PÚBLICO

Esta medida busca reservar el espacio en la calle para que los vehículos de transporte público no vean interferida su operación por el resto del tráfico, ya que por lo general el flujo de vehículos privados es mayor al del transporte público.

Para implementar efectivamente las vías exclusivas al transporte público en la ciudad es muy necesario tener una buena fiscalización, ya que cambiar el comportamiento de los conductores no es inmediato y si al comienzo no ven ningún perjuicio en no cumplir la restricción de circulación, es posible que muchos la incumplan perjudicando el buen funcionamiento de la medida. También es importante desarrollar una buena campaña informativa, donde se destaquen los beneficios y se le informe a los conductores de las calles alternativas que pueden usar.

Respecto de la infraestructura, no debieran ser necesarios mayores cambios, ya que si la vía cumple con un diseño geométrico y de pavimentos que soporta el tráfico mixto, cuando se elimina el flujo de vehículos privados no se generan inconvenientes. Eso sí, es necesario usar buena señalización y de preferencia señales de información variable, que le informen a los conductores por qué calle no pueden circular y cuáles pueden ser las alternativas. Es recomendable mejorar la infraestructura de paraderos, si no es la adecuada, por ejemplo si no hay una buena demarcación del paradero o no existe un refugio.

El siguiente experimento consistió en modelar prioridades al transporte público en tramos de vía (vías exclusivas).

Se eligieron 3 vías para implementar la medida, teniendo en cuenta que son las que en la red real mueven la mayor cantidad de vehículos de transporte público, dos de ellas en el centro de la ciudad: Carampagne y Arauco (unidireccionales), y una que conecta la parte sur de la ciudad con el centro: Picarte (bidireccional). Todas estas vías tienen dos pistas por sentido. En la siguiente figura se muestra la red y las vías elegidas.

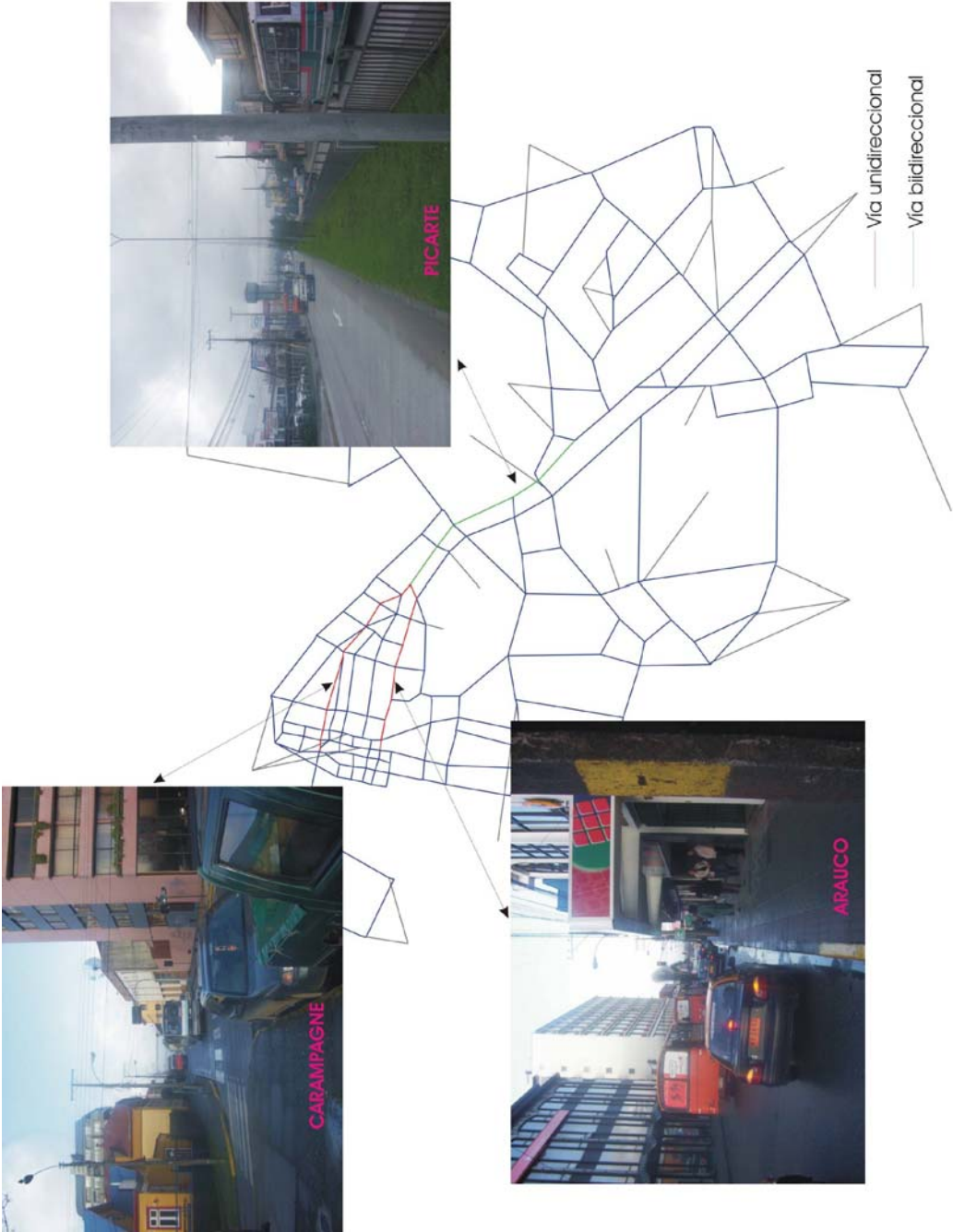


Figura 17. Vías elegidas para adoptar medidas de prioridad al transporte público

Fuente: Elaboración propia

Para realizar la modelación se plantearon dos escenarios: situación base y con vía exclusiva. Para esto se realizaron modificaciones sólo a la red. En el escenario con vías exclusivas se hizo la capacidad igual a cero en la red de transporte privado, mientras que la de transporte público mantuvo una capacidad de 2 pistas. La medida está dada para vehículos de transporte público mayor y menor (taxis colectivos).

El objetivo de la medida es proteger a los vehículos de transporte público de los demás vehículos, y en este caso se decidió hacer las dos pistas exclusivas. Se pensó en probar una pista sólo bus, pero por limitaciones de TRIPS, si se reservaba sólo una pista, los vehículos quedaban confinados a ella y no podían realizar maniobras de adelantamiento, lo cual es perjudicial para los vehículos de transporte público. Los vehículos de transporte público deben poder adelantar al menos en las áreas de parada, para no aumentar el número de detenciones y las demoras a vehículos que no necesiten detenerse en un paradero específico.

Un objetivo más específico de la tesis fue ver el efecto de variaciones en el total de viajes y, por lo tanto, se repitió el experimento amplificando los vectores de generación y atracción de viajes. Las variaciones usadas fueron 90%, 110%, 120% y 140% del original.

5.2 REVERSIBILIDAD DE VÍAS

Implementar una vía reversible seriamente requiere de una muy buena campaña informativa previa al comienzo de su operación y mucha fiscalización, sobretodo al comienzo. Todo esto orientado, no sólo a los conductores sino también a los peatones, ya que estos cambios se producen de un día para otro y en un periodo del día determinado; las personas tienen que cambiar su conducta y ser concientes de ella. Con las vías reversibles se pueden generar muchos accidentes si lo anterior no se cumple.

Respecto a la infraestructura, es necesario revisar los diseños de las intersecciones para asegurar que los radios de giro de los nuevos movimientos estén dentro de la norma y que la visibilidad no se vea disminuida en el caso de las vías secundarias. Además, es necesario incluir nueva señalización, de preferencia variable, que indique el sentido de circulación en el periodo determinado. Tanto con la señalización, como con la demarcación es necesario ser muy cuidadoso para que la doble señalización (una por sentido) no genere dudas en los conductores que pueden terminar en accidentes.

En este experimento se modeló la reversibilidad de una vía, es decir, el cambio de dirección en ciertos periodos del día. La calle escogida es una de las vías con mayor longitud que conecta el centro con la zona sur-oriente de la red, Picarte. Esta vía, en la situación base, es bidireccional y la cantidad de pistas por sentido varía: cerca del centro tiene 2 pistas por sentido y en su tramo sur tiene una pista por sentido. En la siguiente figura se muestra la ubicación de la vía en la red.

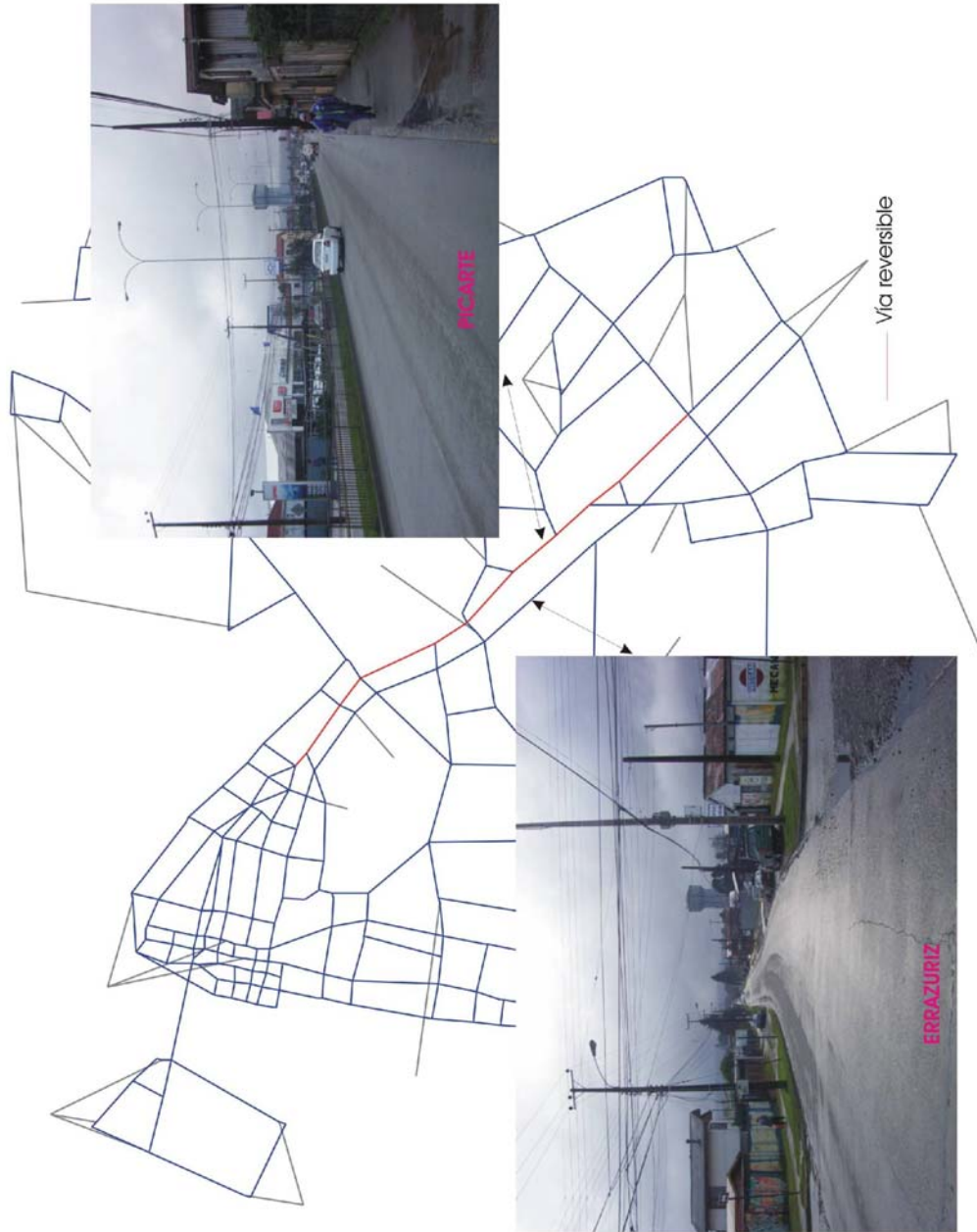


Figura 18. Vía elegida para probar medidas de reversibilidad

Fuente: Elaboración propia

Se plantearon dos situaciones: la base y con vía unidireccional al centro. En el caso de la vía unidireccional fue necesario dejarla con un solo sentido y aumentar su capacidad al doble, además, de modificar los recorridos de transporte público que ocupaban esa vía.

Cada periodo del día tiene asociada una estructura de viajes diferente, que tienen implícita la localización de viviendas y actividades. La red, al menos la parte de infraestructura, es la misma. Como se quería observar la utilidad de hacer una vía reversible, se planteó variar la generación y atracción de viajes, para lograr tener estructuras que pudieran representar distintos periodos del día y distintas conformaciones de ciudad.

Para establecer los distintos escenarios de estructura de viajes se dividió la ciudad en 3 macrozonas: centro, residencial sur-oriental y el resto de la ciudad. Analizando lo que ocurrió en cada macrozona en la situación base se pudo distinguir: en la punta mañana, la zona residencial sur-oriental concentró un 23% de los viajes que se generaron, mientras la zona centro concentró el 30% de viajes de atracción.

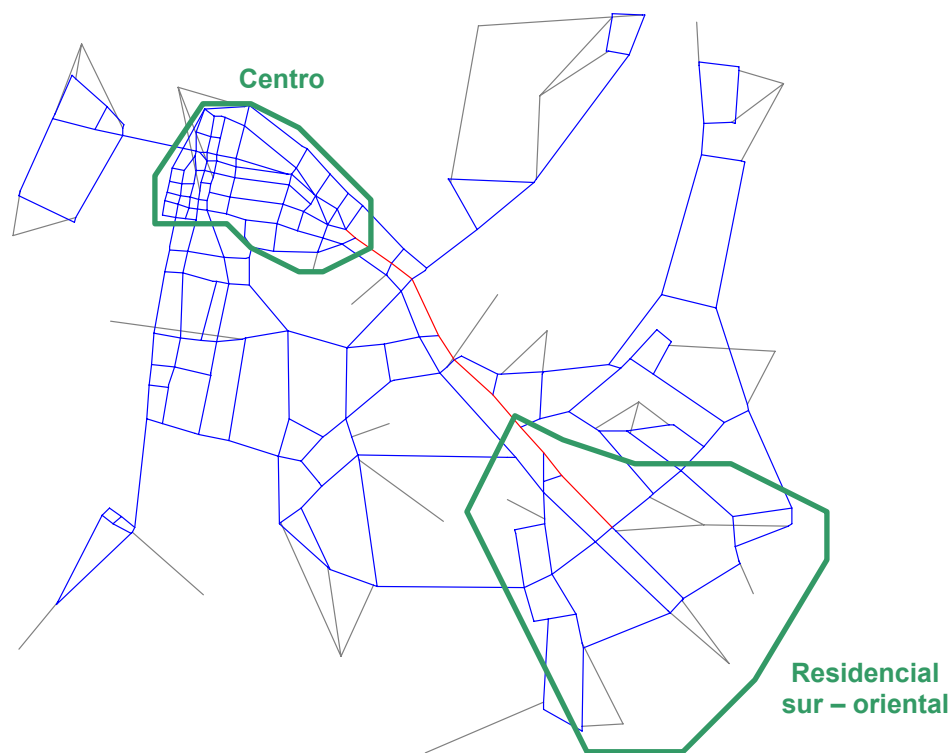


Figura 19. Macrozonas

Fuente: Elaboración propia

Los escenarios fueron definidos, modificando los porcentajes de viajes que se generaron o atrajeron de las macrozonas centro y residencial, y repartiendo los demás viajes en el resto de la ciudad, según las proporciones de la situación base.

A continuación, se presenta una tabla que resume los porcentajes propuestos para cada escenario.

Tabla 20. Porcentaje propuesto por macrozona en los escenarios

Escenario	Generación de viajes		Atracción de viajes	
	Residencial	Resto	Centro	Resto
Base	23	77	30	70
1	20	80	40	60
2	20	80	50	50
3	20	80	20	80
4	20	80	10	10
5	10	90	30	70
6	30	70	30	70
7	40	60	30	70
8	50	50	30	70
9	10	90	10	90
10	40	60	40	60
11	50	50	50	50

Fuente: Elaboración propia

5.3 TARIFICACIÓN VIAL EN UNA ZONA

Esta medida es factible de implementar gracias a las nuevas tecnologías, como los portales de cobro, donde se puede cobrar un peaje sin detener el vehículo. Para establecer una zona tarifada, además del sistema de cobro, debería instalarse un tipo de verificación con pase liberado para vehículos de transporte público o de emergencia, por ejemplo, en todos los accesos al área.

Como en el caso de las otras medidas, el éxito de ésta, se relaciona con una buena campaña informativa donde se explique muy bien, cómo se realiza el cobro y por qué, y además se den diversas alternativas para llegar en vehículo particular —al área tarifada— en el horario de restricción.

Con este experimento, se intentó revisar los efectos de implantar una zona tarifada, donde se cobre cada vez que se entre o salga de ella. Se definió la zona a tarifificar igual que la zona centro, ya que por la agregación de la información, es imposible modelar una tarifificación más pequeña. Se tuvo especial cuidado de no tarifificar ninguna ruta obligada, por lo cual, se dejó un anillo libre alrededor de la zona.

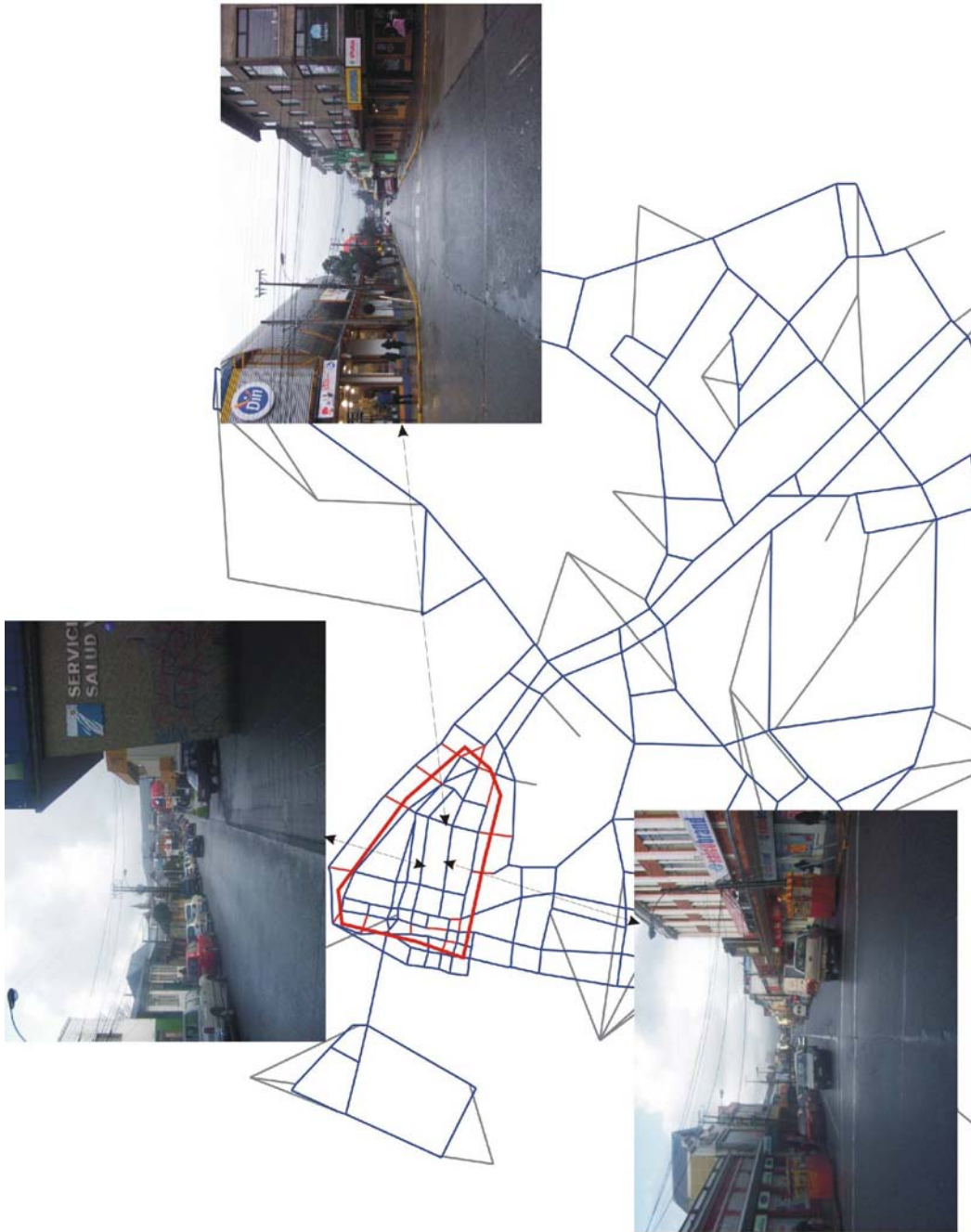


Figura 20. Zona tarifificada

Fuente: Elaboración propia

Para modelar el efecto del cobro se varió la tarifa desde \$0 (situación base) hasta \$500 pesos (pesos de diciembre de 1996, \$734 de diciembre de 2007). Esta variación de tarifa es equivalente a aumentar el costo del viaje en auto desde 0 hasta 10 veces su valor promedio (ver Tabla 19). Los valores de ingreso líquido promedio mensual por hogar por categoría fueron, bajo: \$75.000, medio: \$325.000, y alto: \$750.000 (pesos de diciembre de 1996).

En este experimento se tuvo problemas con el modo auto acompañante, ya que, la función de costo de este modo sólo considera tiempo y disponibilidad del auto en el hogar, por lo cual no es posible incluir el efecto del cobro. Para solucionar esto se decidió mantener la proporción de viajes modo auto chofer y auto acompañante. Para esto, se modificó el cálculo de la utilidad del modo auto acompañante y reemplazándola por la siguiente relación:

$$\exp(\mu_{a.acomp}) = K \exp(\mu_{a.chofer}) \quad (19.)$$

donde:

$\mu_{a.acomp}$ = utilidad del modo auto acompañante
 $\mu_{a.chofer}$ = utilidad del modo auto chofer
K = proporción de viajes entre auto acompañante y auto chofer, en la situación base

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se revisan los resultados obtenidos de los experimentos y se hace un análisis detallado, verificando si éstos concuerdan con lo esperado, y como se explican las diferencias. Primero se examinan los resultados de las medidas de prioridad al transporte público, luego los de la reversibilidad de vías y por último, los referidos a la tarificación de una zona.

6.1 PRIORIDAD AL TRANSPORTE PÚBLICO

El experimento de dar prioridad al transporte público consistió básicamente en la modelación de vías exclusivas en las tres calles más usadas por el transporte público en la red: Carampagne, Arauco y Picarte. Para realizarlo se eliminaron las 3 calles de la red de transporte privado y se mantuvieron habilitadas para el transporte público. Se modelaron dos escenarios: la situación base y con vías exclusivas, primero con la cantidad de viajes que originalmente se tenían, y luego se varió esta cantidad de viajes desde 10% menos hasta 40% más.

6.1.1 Análisis sin variación en la generación

Lo primero que se analiza dentro de este experimento son los resultados manteniendo la cantidad de viaje de la situación base.

a. Distribución

Para analizar posibles cambios en la distribución se optó por comparar celda a celda las matrices y obtener el porcentaje de viajes que cambian su par origen-destino, inicialmente, para los viajes de toda la ciudad, seguido por la comparación por propósito. En el caso de la vía exclusiva para transporte público un 3,4% de los viajes modificaron su par origen-destino. Este cambio fue más pronunciado en los viajes con propósito trabajo, donde en un 4,3% de los viajes se produjo una variación en el par origen-destino.

Las mayores variaciones no se produjeron, necesariamente, en las zonas más cercanas a las vías exclusivas. Al revisar el caso de los mayores cambios por zona origen, estas no se localizan cerca de las calles donde se implementó la medida, pero sí lo hacen las zonas destino con las modificaciones más pronunciadas. La mayoría de las zonas con alteraciones importantes en el origen están en el área oriente, mientras que para el destino están en el centro-poniente. La vía exclusiva sirve justamente a los viajes entre el área oriente y el centro-poniente, por esto los viajes entre estas áreas pueden usarla de manera completa, produciendo las mayores variaciones en sus costos de viajes y por lo tanto los cambios más relevantes en la distribución.

A continuación, se muestran las zonas con mayores variaciones, en magenta las zonas origen, en azul las zonas destino.

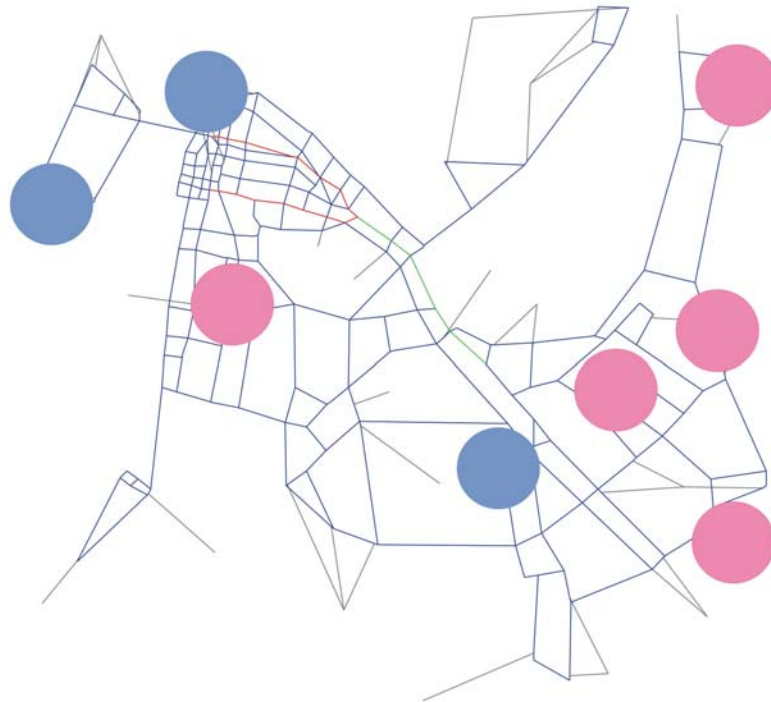


Figura 21. Ubicación de zonas con mayor variación en la distribución de los viajes

Fuente: Elaboración propia

b. Partición modal

Analizando los resultados de la modelación de las vías exclusivas, sin modificar el escenario de generación de viajes, se observó que si bien se presentan cambios en la partición modal, estos son pequeños. Variaciones de menos del 6% en la partición modal de toda la ciudad, y de menos de 8% cuando se analizaron sólo los viajes que llegan o salen de la zona centro.

Las modificaciones más fuertes se obtuvieron al revisar sólo los viajes que llegan al centro, ya que estos, en transporte público, fueron los más beneficiados por: el periodo modelado (punta mañana); la estructura de la ciudad —donde en el centro se concentra la mayor atracción de viajes— y la ubicación de las vías elegidas para aplicar la medida.

A continuación, se presenta la partición modal, para los 5 modos que fueron modelados, y en agrupación por modos no motorizados, de transporte público y privado. Se presenta la situación considerando los viajes de toda la ciudad, y también examinando sólo los viajes que salen del área centro (desde el centro) y sólo los viajes que llegan al centro (hacia el centro).

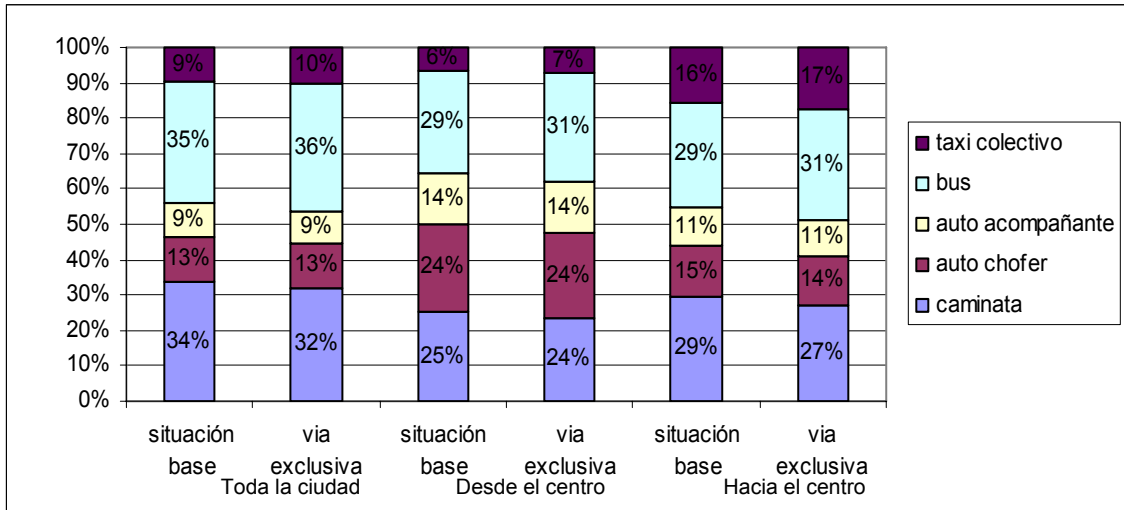


Figura 22. Partición modal, todos los modos, situación base y con vías exclusivas, viajes en toda la ciudad y zona centro

Fuente: Elaboración propia

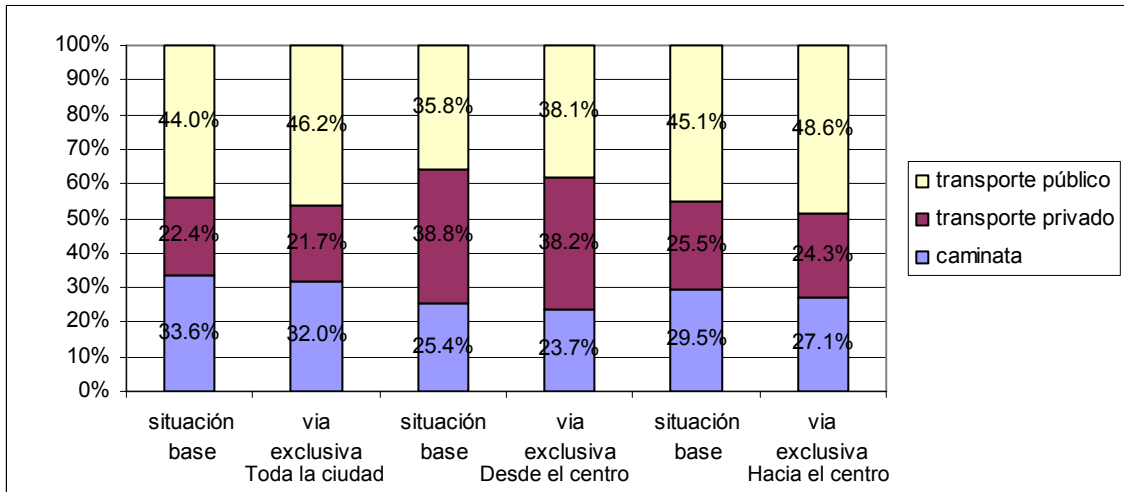


Figura 23. Partición modal, modos agrupados, situación base y con vías exclusivas, viajes en toda la ciudad y zona centro

Fuente: Elaboración propia

Se observa que los cambios en la partición modal se dieron de manera más fuerte entre la caminata y los modos de transporte público. Dado que el 61% de los viajes no tiene disponible el modo auto chofer, estos viajes sólo pueden escoger entre modos de transporte público y caminata. Esto produjo que las reducciones en el costo de viaje generalizado del transporte público lograran subir el porcentaje de usuarios que viaja en estos modos reduciendo el porcentaje que lo hace caminando.

c. Asignación

Con la eliminación de las tres calles de la red para el transporte privado es evidente que se produjo un cambio en la asignación de los viajes a la red. Hubo cambios importantes en los corredores donde se aplicó la medida y en los paralelos más cercanos a éstos, pero también hubo variaciones en un área mayor al centro.

Al revisar los grados de saturación de los movimientos directos sobre los corredores, tal como se esperaba al disminuir el flujo, estos se redujeron, pasando de un máximo de 60% en la situación base a un 49% con la aplicación de la medida. Con el crecimiento de flujo en las otras calles se aumentaron los grados de saturación, siendo los más notorios los que se presentan justamente en los corredores donde hay un aumento de flujo, aunque más que poder identificar corredores más congestionados, los aumentos más fuertes se dieron en una o dos intersecciones.

En la siguiente figura se muestran los cambios en la asignación y se representan con bandas rojas las calles con aumento de flujo y las reducciones en azul.

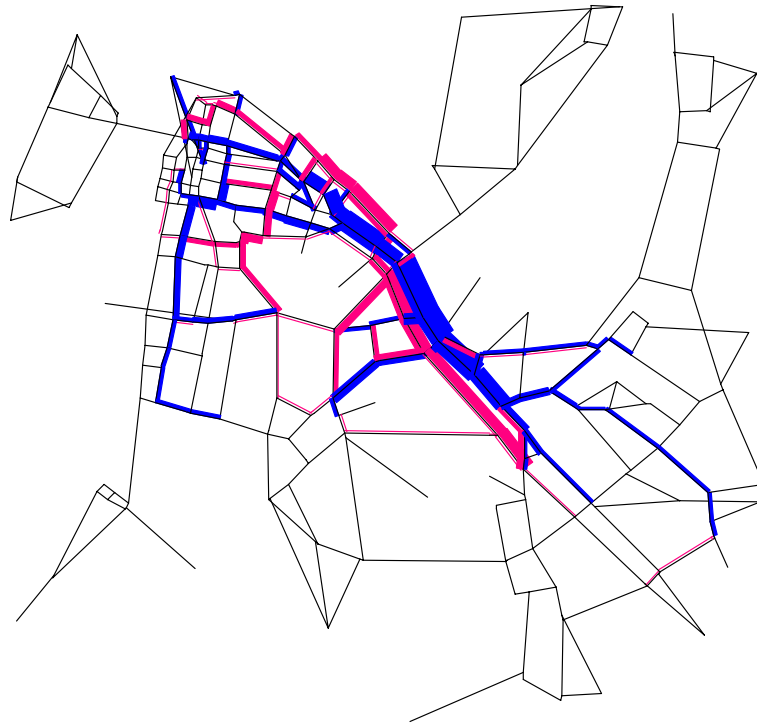


Figura 24. Cambios en la asignación de flujo a la red

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se pueden ver los máximos grados de saturación de las intersecciones, tanto para la situación base, como para las vías exclusivas.

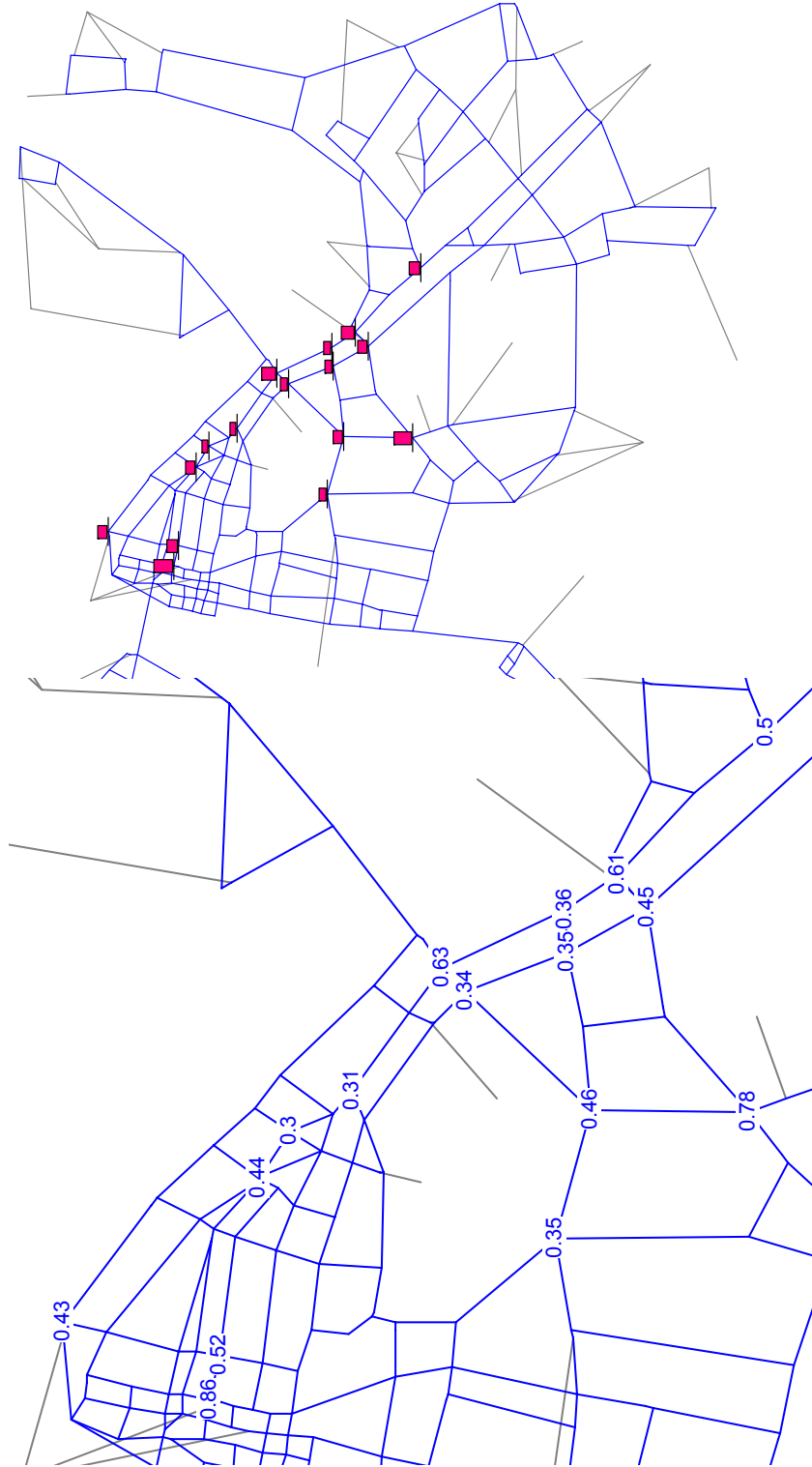


Figura 25. Grados de saturación superiores a 30% en la situación base

Fuente: Elaboración propia

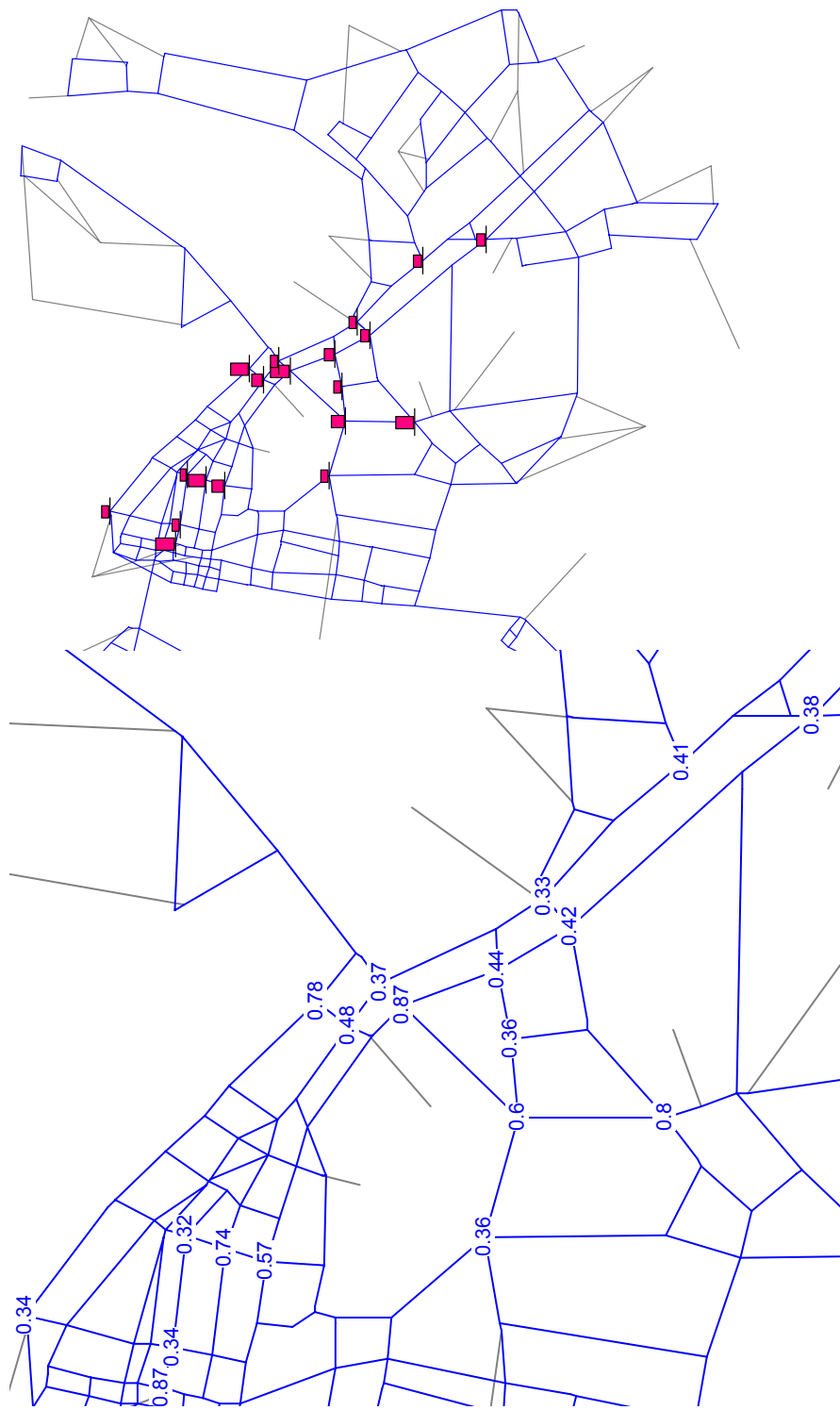


Figura 26. Grados de saturación superiores a 30% con vías exclusivas

Fuente: Elaboración propia

En la figura anterior también se aprecia como esta medida, que sólo se aplica en 3 corredores de la ciudad, tuvo un impacto importante en la asignación dentro de una parte de la red y no sólo sobre las vías inmediatas a los corredores donde se aplicó.

d. Tiempo de viaje e índice de rendimiento

Con la aplicación de la medida la mayoría de las líneas de transporte público disminuyeron su tiempo de viaje, entre un 0,27% y un 4,05%. Las líneas que más acortaron su tiempo fueron las que se concentran en las vías donde se aplicó la medida. Sólo dos líneas (taxis colectivos) aumentaron su tiempo de viaje, principalmente, usaron calles alternativas y no las vías exclusivas. De todas formas a nivel global se obtuvieron resultados positivos para el transporte público.

Analizando los tiempos de viaje en los corredores se revisó si las variaciones se muestran de manera más pronunciada en los arcos o en las intersecciones, pero se comprobó que tanto el tiempo en movimiento, como las demoras aumentaron en la misma medida, manteniéndose la proporción entre ellas.

Además, se lograron reducciones de hasta un 7% en el tiempo de viaje del transporte público en los corredores donde se aplicó. Dentro de estos, fue más grande la reducción en Picarte, que conecta la zona sur-oriente con el centro; y la menor reducción también fue en este corredor, pero en sentido contrario. Esto se explica, porque esta vía en la punta mañana lleva una gran cantidad del flujo hacia el centro, al tener pocas calles paralelas que logren conectar las mismas zonas; pero en sentido contrario hay pocos viajes y poco flujo de transporte privado, por lo tanto, su eliminación no logró un efecto importante en ese sentido.

Revisando el tiempo de viaje en los demás corredores del área de influencia, se nota que los mayores cambios se produjeron en tres corredores en sentido hacia el centro, donde el aumento del tiempo de viaje fue entre 11% y 20%.

Para comparar los posibles beneficios de las medidas se construyó un índice de rendimiento dependiente del tiempo de viaje y del costo de combustible, muy similar al tipo de índice de rendimiento que se usa en softwares como TRANSYT. La forma funcional es:

$$IR = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^z \sum_{k=1}^z C_{TV} TV_{ijk} D_{ijk} + \sum_{l=1}^a \sum_{m=1}^t C_{cc_{lm}} F_{lm} \quad (20.)$$

donde:

- IR = Índice de rendimiento (\$/hora)
- C_{TV} = Costo social del tiempo de viaje (\$/min)
- TV_{ijk} = Tiempo de viaje para el modo i, entre el par j-k (min/viaje)
- D_{ijk} = Viajes en el modo i, entre el par j-k (viajes/hora)
- $C_{cc_{lm}}$ = Costo de consumo de combustible en el arco l, para el tipo de vehículo m (\$/veh)
- F_{lm} = Flujo de vehículos tipo m en el arco l (veh/hora)
- n = modos
- z = zonas
- a = arcos
- t = tipo de vehículos

Este índice se calculó primero para cada grupo de modos: no motorizados (caminata), de transporte público (buses y taxis colectivos) y transporte privado (auto chofer y acompañante); y se dividió por la cantidad de pasajeros del modo, para poder comparar entre los modos. A continuación, se presentan los valores de estos índices para los distintos modos, para una hora en el periodo punta mañana.

Tabla 21. Índices de rendimiento por modo y pasajero

	Situación base	Vías exclusivas
Índice caminata \$/h-pax	2,90	2,79
Índice transporte privado \$/h-pax	83,26	87,80
Índice transporte público \$/h-pax	149,75	137,48

Fuente: Elaboración propia

En este caso se logró una disminución en los índices de la caminata y del transporte público. La baja en el índice de caminata se explica porque los viajes que se cambiaron al transporte público son los más largos, y esto acortó la distancia promedio de viaje en este modo. El índice para el transporte público bajó, lo cual era de esperarse, ya que bajó el tiempo de viaje promedio por pasajero en un 11,7%, y bajó el consumo de combustible total en estos modos en un 0,3%.

La baja en los índices de estos modos compensó el alza en el transporte privado, permitiendo una reducción en el índice total del 2,3%, pasando de \$2.549.375 a \$2.491.063. Esta reducción tan pequeña se explica además por los cambios modales, ya que la caminata y el transporte privado redujeron su participación, teniendo un índice por pasajero menor al transporte público.

6.1.2 Análisis con variación en la generación

Para ver la influencia de la cantidad de viajes en los beneficios de hacer vías exclusivas se realizaron varios escenarios de generación de viajes, variando la cantidad de viajes entre un 90% y un 140% de los viajes en la situación original.

a. Distribución

Al realizar variaciones en la cantidad de viajes en el sistema se lograron variaciones en la distribución muy similares a la presentada en la situación de generación base, mostrando estabilidad con el aumento de viajes. A continuación, se presenta el porcentaje de viajes que cambia el par origen-destino para cada escenario tarifario, por propósito de viaje.

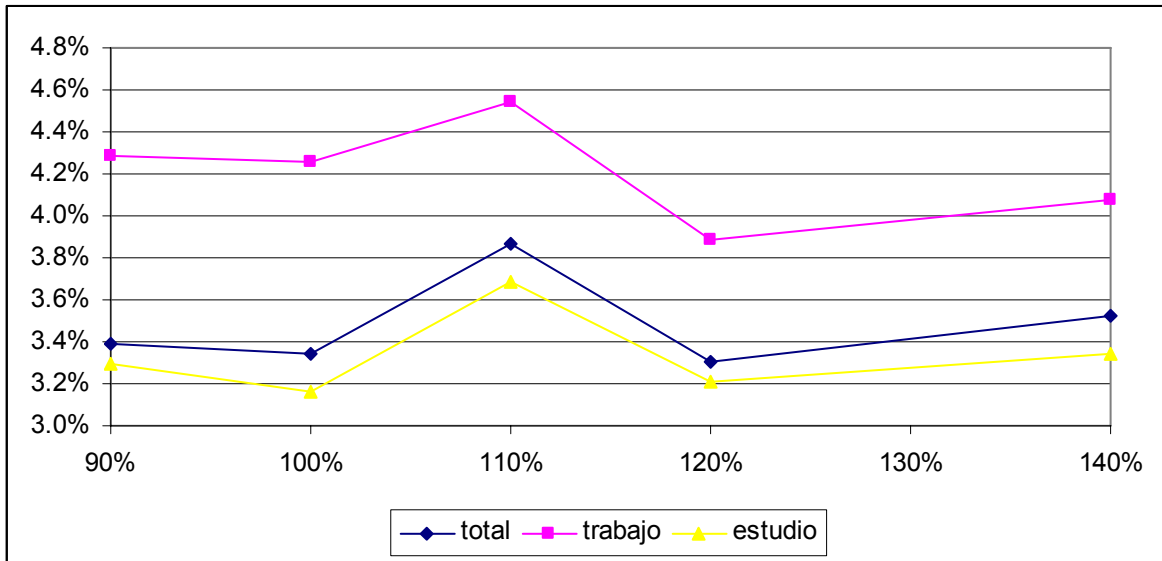


Figura 27. Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino en cada escenario de generación de viajes

Fuente: Elaboración propia

La tendencia clara es ver que en los viajes con motivo trabajo se produce un cambio mayor que en los de estudio. Esto puede deberse a que el parámetro del modelo de costo compuesto es mayor para el trabajo que para el estudio, por lo cual las variaciones en el tiempo de viaje influyen más en los viajes de trabajo.

b. Partición modal

Con estas variaciones se comprueba que existe una tendencia en las variaciones de la partición modal; fueron calculadas como el porcentaje de variación entre la cantidad de viajes por modo, en la situación base y con las vías exclusivas, para cada escenario de generación de viajes. Esta tendencia es de aumento de la participación del modo bus y de disminución en la participación de los demás modos. Estos cambios respecto a la mayor cantidad de viajes en la ciudad muestran cierta estabilidad respecto a la cantidad de viajes inicial. A continuación, se presentan estas tendencias por grupos de modos.

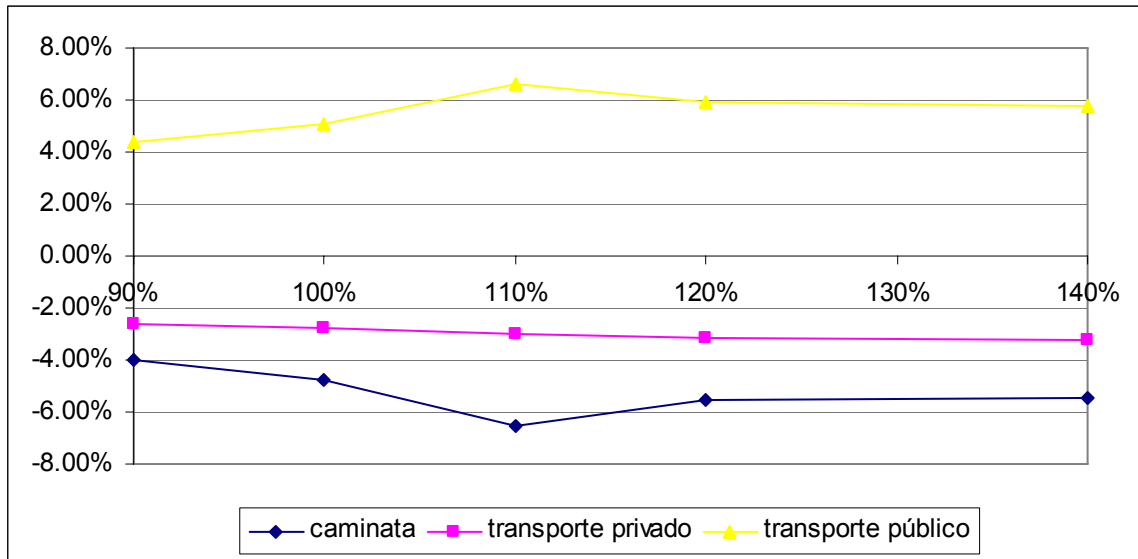


Figura 28. Diferencias en la partición modal agrupada, para los escenarios de generación de viajes

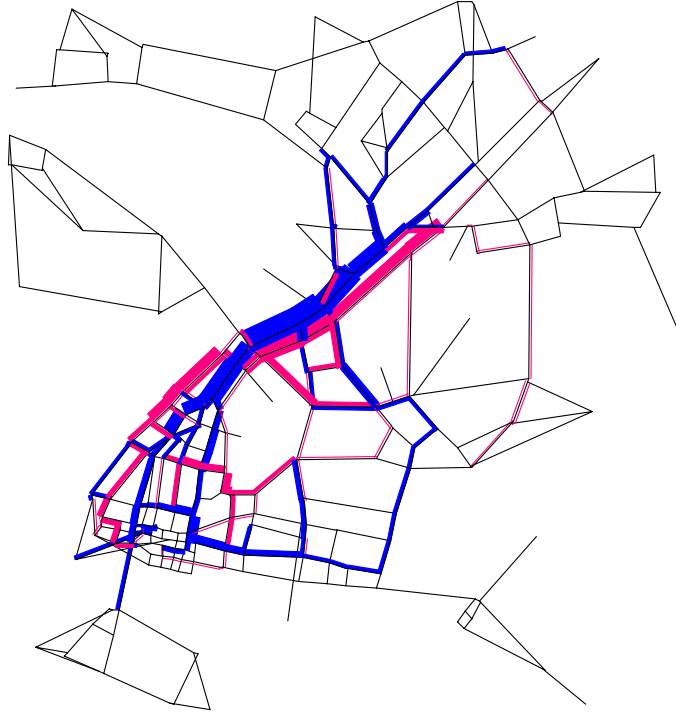
Fuente: Elaboración propia

Las pequeñas variaciones que se dieron entre escenarios de aumento de viajes en la partición modal se deben a que la congestión se va presentando en cada intersección en distintos escenarios de la modelación y dado que la ruta del transporte público es fija, no puede reasignarse. Otra causa sería porque la medida consiste en reservar ciertas calles para el uso exclusivo del transporte público y por lo tanto las demoras que afectan a los demás modos se generan en otras intersecciones, que crecen en forma diferente.

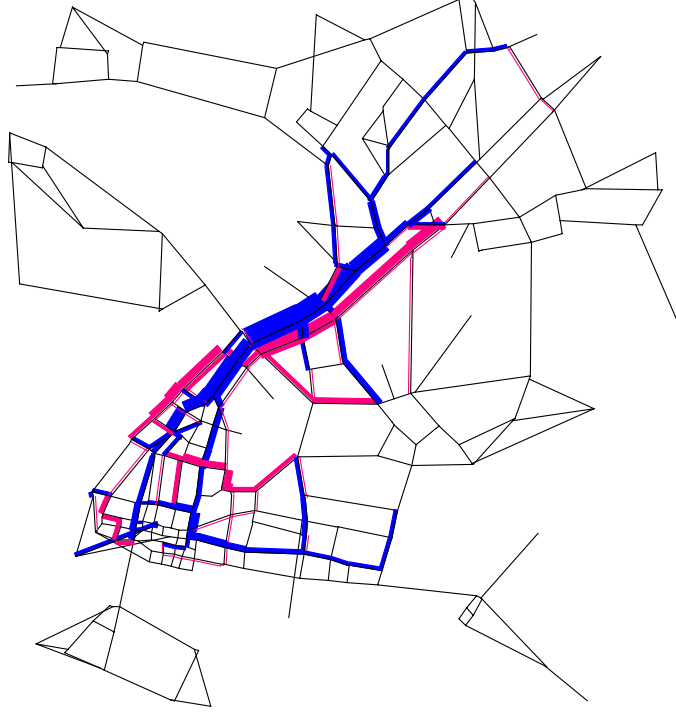
c. Asignación

Con el aumento en la cantidad de viajes los cambios en la asignación se vuelven más pronunciados. Por un lado, aumenta el área de la red que se ve afectada por la medida, y además, en las vías donde ya se producían variaciones, estas en general crecen. De igual forma con la congestión, si aumenta la cantidad de viajes aumentan los grados de saturación de las intersecciones.

A continuación, se muestran las diferencias en la asignación a la red y los grados de saturación de las intersecciones para la situación base y con vía exclusiva de distintos escenarios de cantidad de viajes. Las bandas azules corresponden a disminución de flujo, mientras las rojas a aumento.



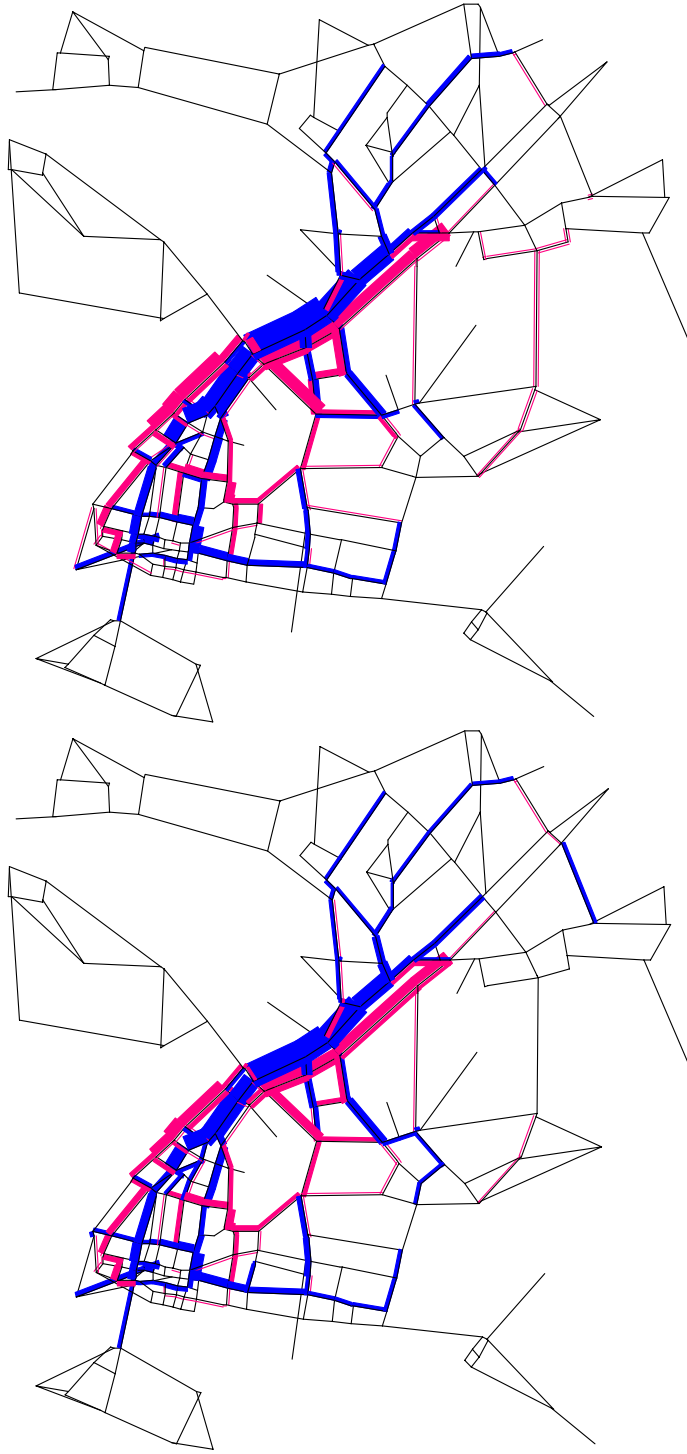
Generación al 110%



Generación al 90%

Figura 29. Cambios en la asignación de flujo a la red para los distintos escenarios

Fuente: Elaboración propia

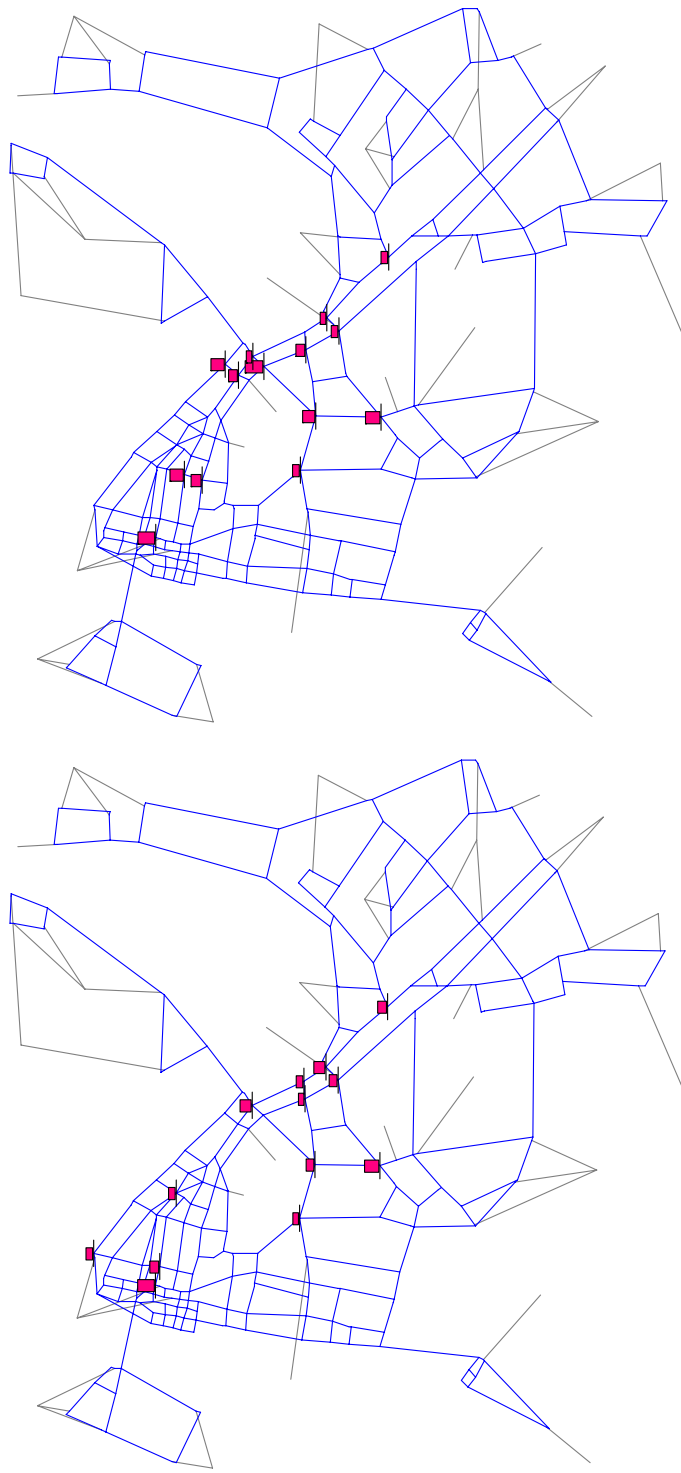


Generación al 120%

Generación al 140%

Figura 30. Cambios en la asignación de flujo a la red para los distintos escenarios

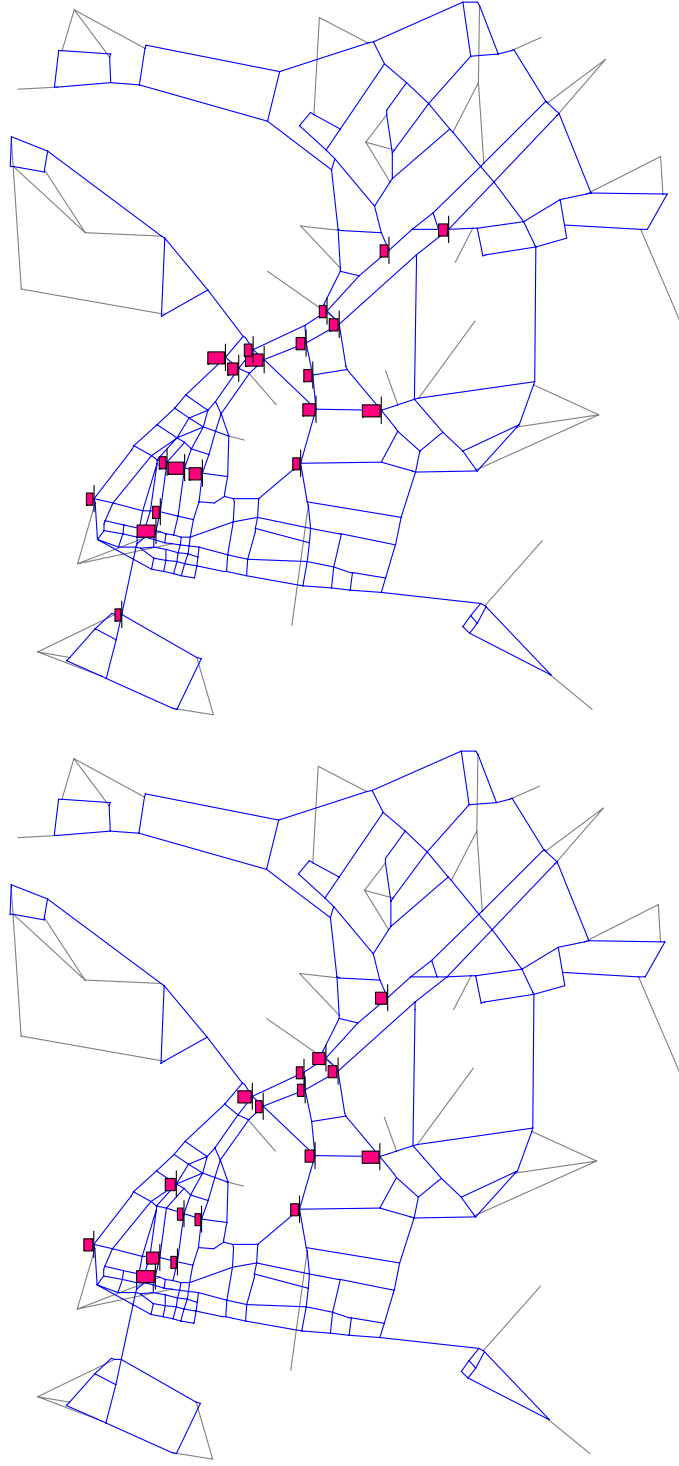
Fuente: Elaboración propia



Situación base

Con vía exclusiva

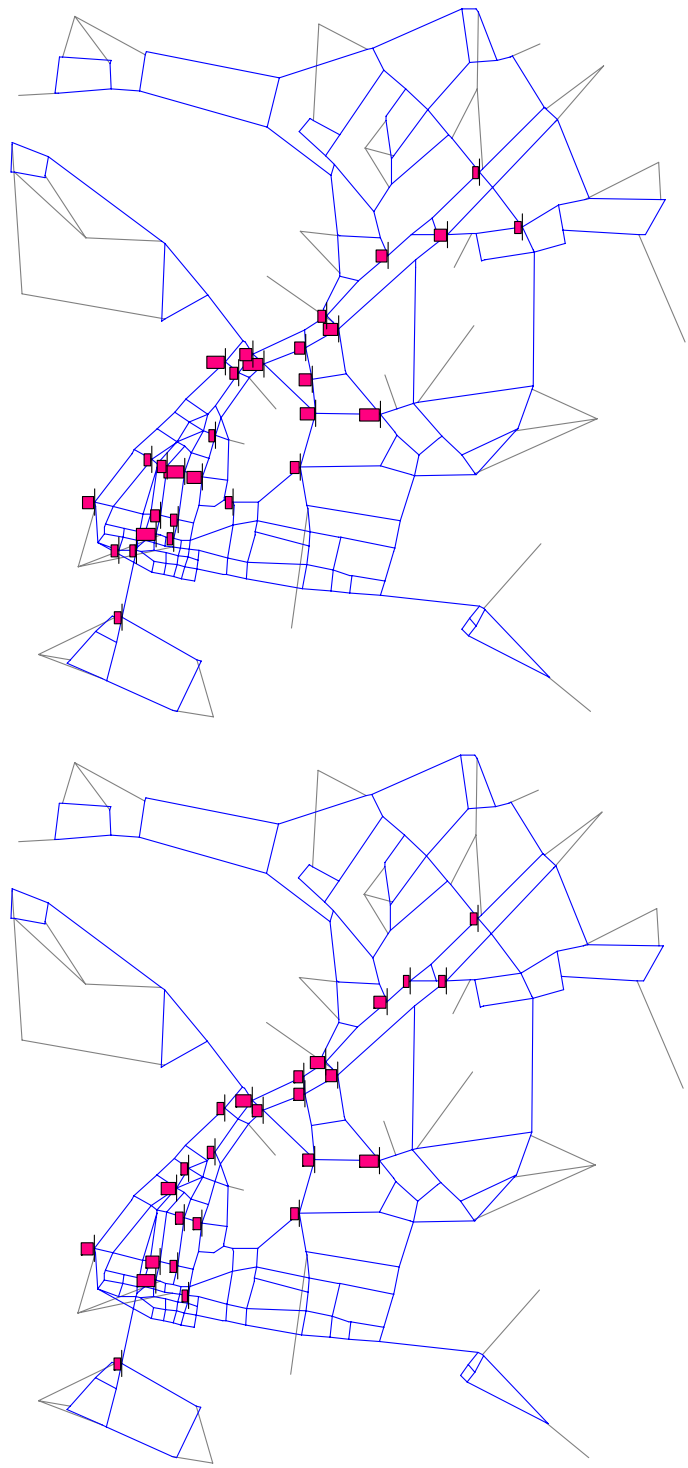
Figura 31. Grados de saturación superiores a 30%, situación base y con vías exclusivas, generación al 90%
 Fuente: Elaboración propia



Situación base

Con vía exclusiva

Figura 32. Grados de saturación superiores a 30%, situación base y con vías exclusivas, generación al 110%
 Fuente: Elaboración propia



Con vía exclusiva

Situación base

Figura 33. Grados de saturación superiores a 30%, situación base y con vías exclusivas, generación al 140%
Fuente: Elaboración propia

En las figuras anteriores se aprecia que a medida que aumentaron los viajes se distingue una tendencia a que también aumentara la congestión en algunas vías. Esto no se puede establecer como regla general, ya que una calle donde aumentó cierta cantidad de viajes en un escenario, no necesariamente va a seguir sumando flujo a mayor cantidad de viajes del escenario, dado que los efectos de la congestión no son los mismos en toda la red.

Lo relevante aquí es observar la comparación entre los puntos más congestionados y el aumento de los viajes. En general las intersecciones de las vías exclusivas bajan sus grados de saturación, mientras que las intersecciones de las vías paralelas aumentan. También lo hacen otros puntos un poco más alejados de las vías exclusivas, pero que son parte de rutas alternativas, no necesariamente usando las vías paralelas. En estas intersecciones se nota cierta tendencia a presentar aumentos en los grados de saturación con mayor cantidad de viajes.

d. Tiempo de viaje e índice de rendimiento

Dado que en el modelo de partición modal se considera un nido de transporte público, las diferencias entre las líneas de los dos modos bus y taxi colectivo, paulatinamente, cobran relevancia con los problemas de congestión de algunas intersecciones.

En promedio las líneas de buses tuvieron una mayor disminución del tiempo de viaje que las de taxis colectivos. Esto se debe a que las rutas de buses, usaron más las vías exclusivas que las de taxis colectivos.

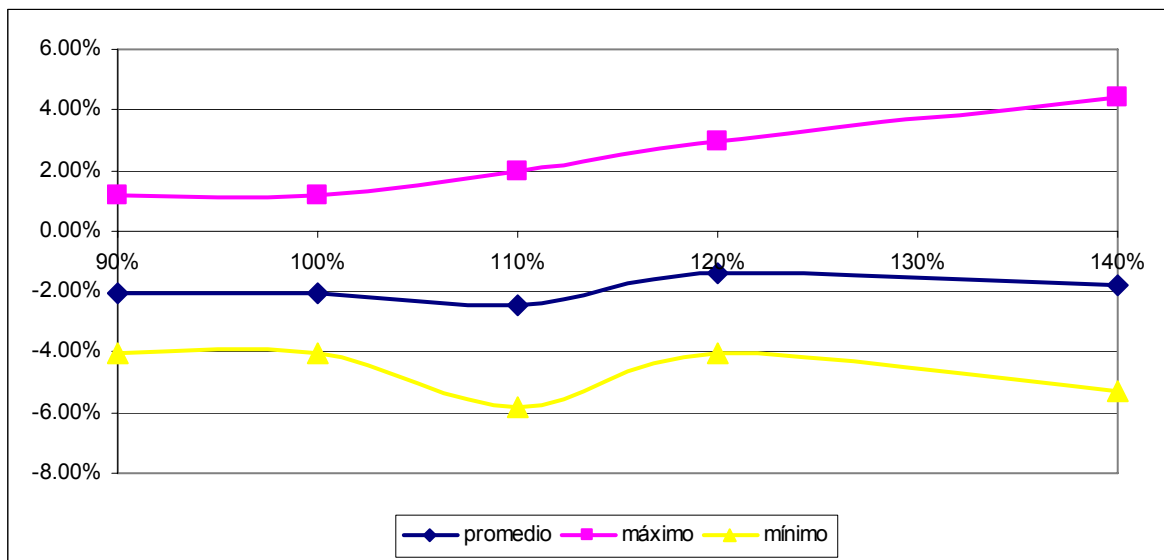


Figura 34. Variaciones en el tiempo de viaje de las líneas de transporte público

Fuente: Elaboración propia

En el tiempo de viaje del transporte privado se indica una clara tendencia en los cambios que se producen, ya que siempre aumentaron con la implementación de la medida y este cambio fue creciente con la cantidad de viajes. En el caso del transporte público también se observa una tendencia de disminución del tiempo de viaje con la medida, alrededor de un 12%, pero no hubo mayor modificación en esta variación respecto a la cantidad de viajes en el sistema.

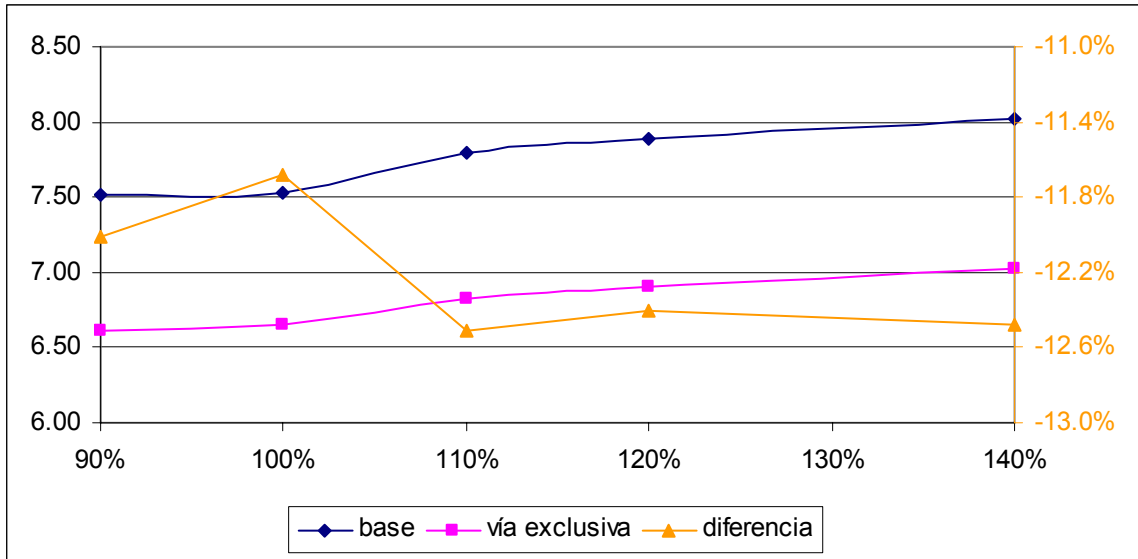


Figura 35. Tiempo de viaje en situación base y vía exclusiva, según escenario de generación, para transporte público

Fuente: Elaboración propia

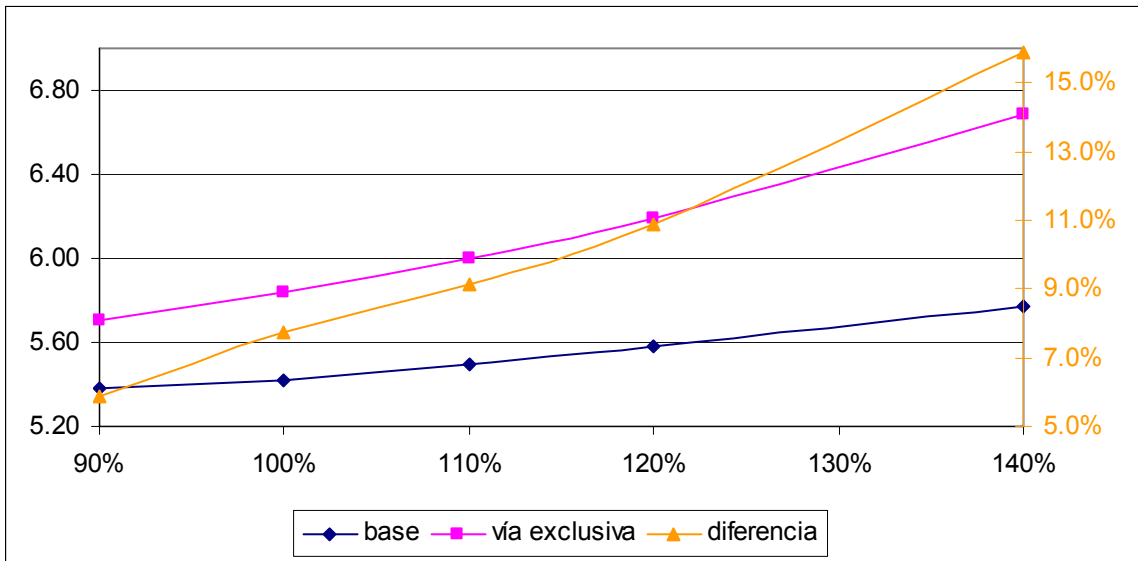


Figura 36. Tiempo de viaje en situación base y vía exclusiva, según escenario de generación, para transporte privados

Fuente: Elaboración propia

El hecho de que las variaciones del tiempo de viaje de los privados aumentarían con los viajes y no así las del transporte público se debe a que el transporte público es asignado a ruta fija, mientras que los privados podrían elegir vías menos congestionadas en las distintas situaciones.

Con los índices de rendimiento por modo se vuelve a notar una tendencia en el transporte privado que no puede verse en el transporte público, su relación con el aumento de viajes. El indicador para el transporte público disminuyó un 9% aproximadamente. Para la caminata el índice refleja muy bien lo que pasó con el largo de viaje promedio, y se calcula que en general disminuyó alrededor de un 4%, pero tampoco se observa una tendencia de que estos cambios se relacionen con la cantidad de viajes.

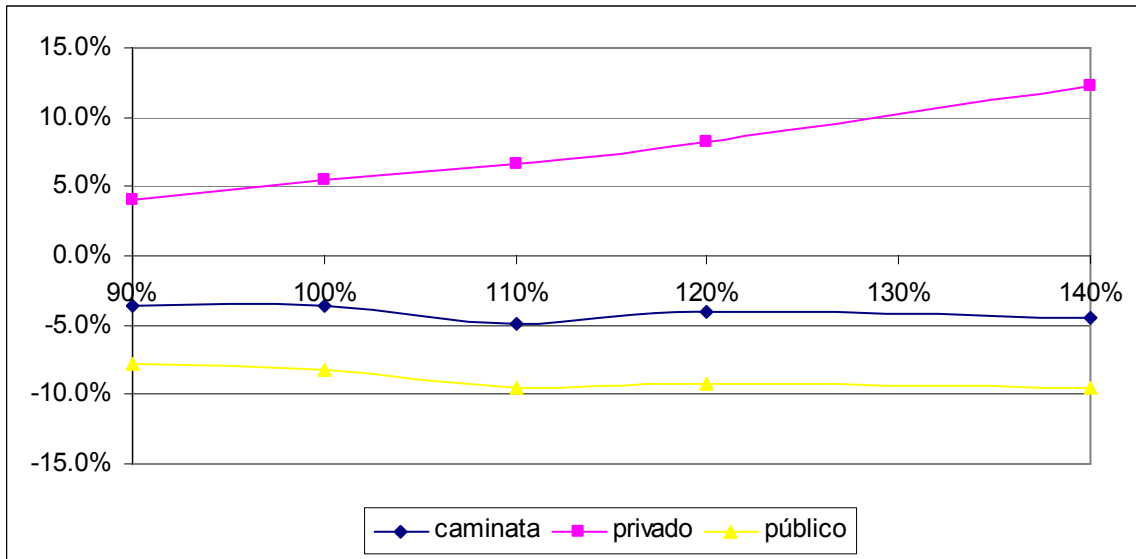


Figura 37. Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero, según escenario de generación de viajes

Fuente: Elaboración propia

Lo que ocurrió con los índices de rendimiento por modo está directamente relacionado con el tiempo de viaje promedio. Como se observa el índice para el transporte privado siempre aumentó, mientras que para el transporte público y la caminata siempre disminuyó. Cuando se calculó el índice total, se vio que el aumento en el transporte privado logró ser compensado y superado por los demás modos. La tendencia que presentó el índice total siguió la del transporte privado, dado que las variaciones en los otros modos se mantuvieron alrededor de un mismo valor, es decir, las variaciones fueron decrecientes con la cantidad de viajes en el sistema.

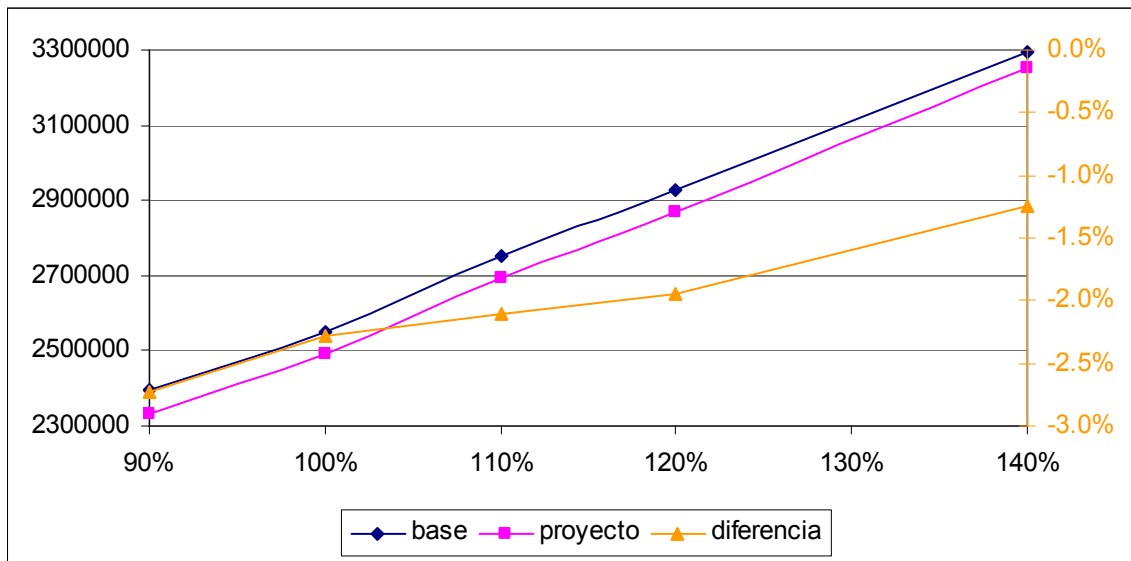


Figura 38. Índice de rendimiento total, según escenario de generación de viajes, en \$/hora

Fuente: Elaboración propia

Como parte de los objetivos se planteó hacer una comparación entre lo reportado en la literatura y los resultados obtenidos.

Para el caso de vías exclusivas se encontró poca información sobre sus efectos en la demanda de tráfico. Sin embargo, hay evidencias de que planes más integrales, donde las vías exclusivas son sólo una de las medidas, han logrado cambios en la partición modal. Por ejemplo, en el caso de Transmilenio en Bogotá el paso de usuarios de transporte privado al público en el sistema es de 10%. En el caso del experimento son mucho menores, 6%, pero incluyendo los cambios desde la caminata. Las diferencias entre resultados se deben a que Transmilenio incluye cambios profundos de reestructuración del sistema de transporte público, además de la congestión en Bogotá, ciudad que no puede considerarse de tamaño medio.

6.2 REVERSIBILIDAD DE VÍAS

La vía que se modeló como reversible fue Picarte, dada su continuidad y conexión del área residencial sur-oriental con el centro. Para modelarla se eliminaron los arcos con sentido sur-oriente y se amplió la capacidad de los arcos en sentido al centro. Primero se realizó el experimento manteniendo la estructura de los vectores de origen y destino de la situación base, pero después se varió la estructura de estos vectores, para ver los efectos en los resultados.

6.2.1 Análisis sin variación en los vectores de atracción y generación de viajes

a. Distribución

Al comparar las matrices de distribución de los viajes se observó que un 1,4% del total de los viajes modificaron su par origen-destino, mientras que por propósito fueron un 2% los viajes al trabajo y un 1,5% los de estudio.

Si bien en principio puede parecer extraño que el porcentaje de viajes que modificó su par origen-destino fue menor en total, esto ocurre porque las variaciones son mínimas, en muchos

casos sólo un viaje y en algunas zonas las variaciones en los totales de viajes se compensaron al disminuir en un propósito y aumentar en el otro.

Como los costos por propósito no dependen de los mismos factores (p. ej. las diferencias en el valor del tiempo de viaje o el hecho de que el auto chofer no sea un modo disponible para los viajes al estudio, etc.), las modificaciones en la distribución no siguen la misma tendencia en los dos propósitos.

b. Partición modal

Analizando los resultados de la modelación de las vías reversibles, sin modificar los vectores de atracción y generación de viajes, se distingue que, prácticamente, no se presentaron cambios en la partición modal, de menos de un punto porcentual aun agrupando los modos o revisando los cambios sólo en los viajes que salen o entran al centro. A continuación, se presentan la partición modal, en agrupación por modos no motorizados, de transporte público y privado.

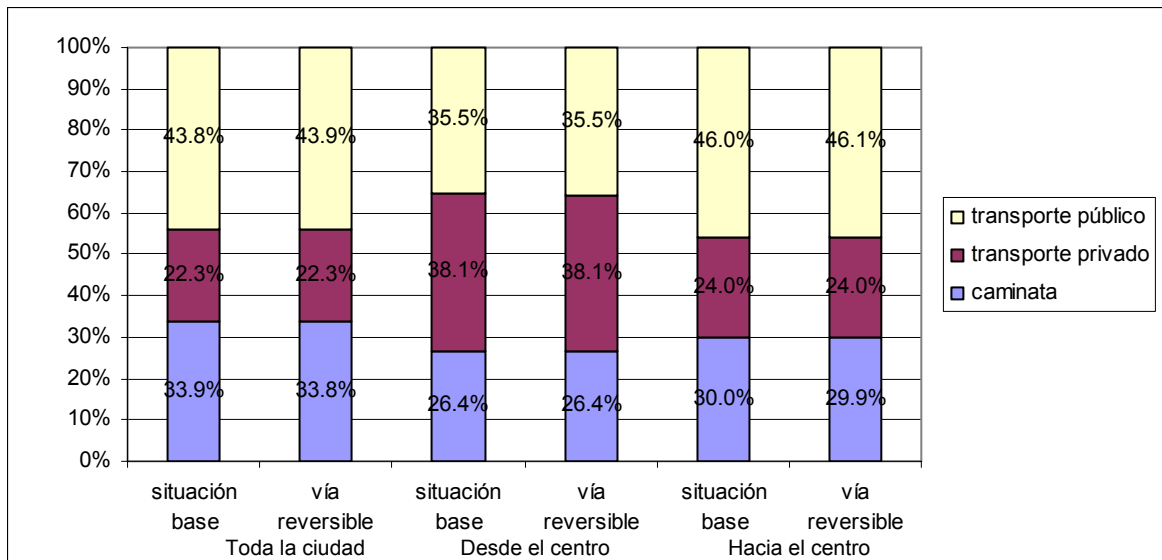


Figura 39. Partición modal, modos agrupados, situación base y con vía reversible, viajes en toda la ciudad y zona centro

Fuente: Elaboración propia

El hecho de que no ocurrieran cambios relevantes, de más de un 1%, en la partición modal se debe a que la medida es muy localizada, y además que los cambios en tiempo de viaje o consumo de combustibles son muy pequeños, como se puede ver más adelante.

c. Asignación

Como se muestra en la siguiente figura, prácticamente, todo el flujo que se eliminó de Picarte pasa a Errázuriz (banda azul disminución de flujo, roja aumento). En la figura también se puede observar que esta medida produjo cambios muy locales.

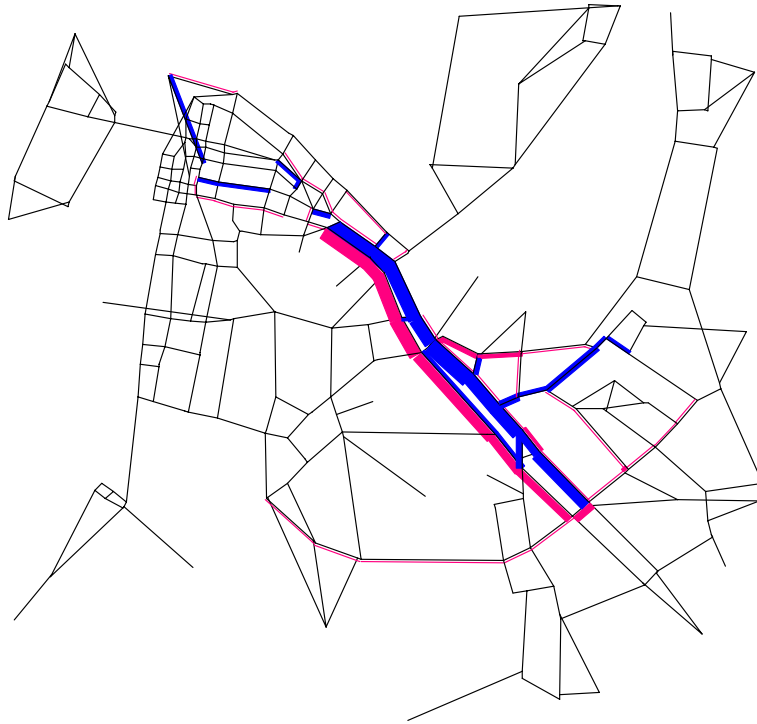


Figura 40. Cambios en la asignación de flujo a la red

Fuente: Elaboración propia

Con los cambios en la asignación de flujos era de esperar que los grados de saturación bajaran en Picarte y aumentaran en Errázuriz. Sin embargo, no en todas las intersecciones de Picarte ocurrió esto, debido a que los flujos por algunas las calles transversales aumentaron debido a que los flujos debían cruzar hacia el sector nororiente y sólo tenían algunas calles donde poder hacerlo, a diferencia de cuando circulaban por Picarte, que disponían de más opciones para llegar a este sector.

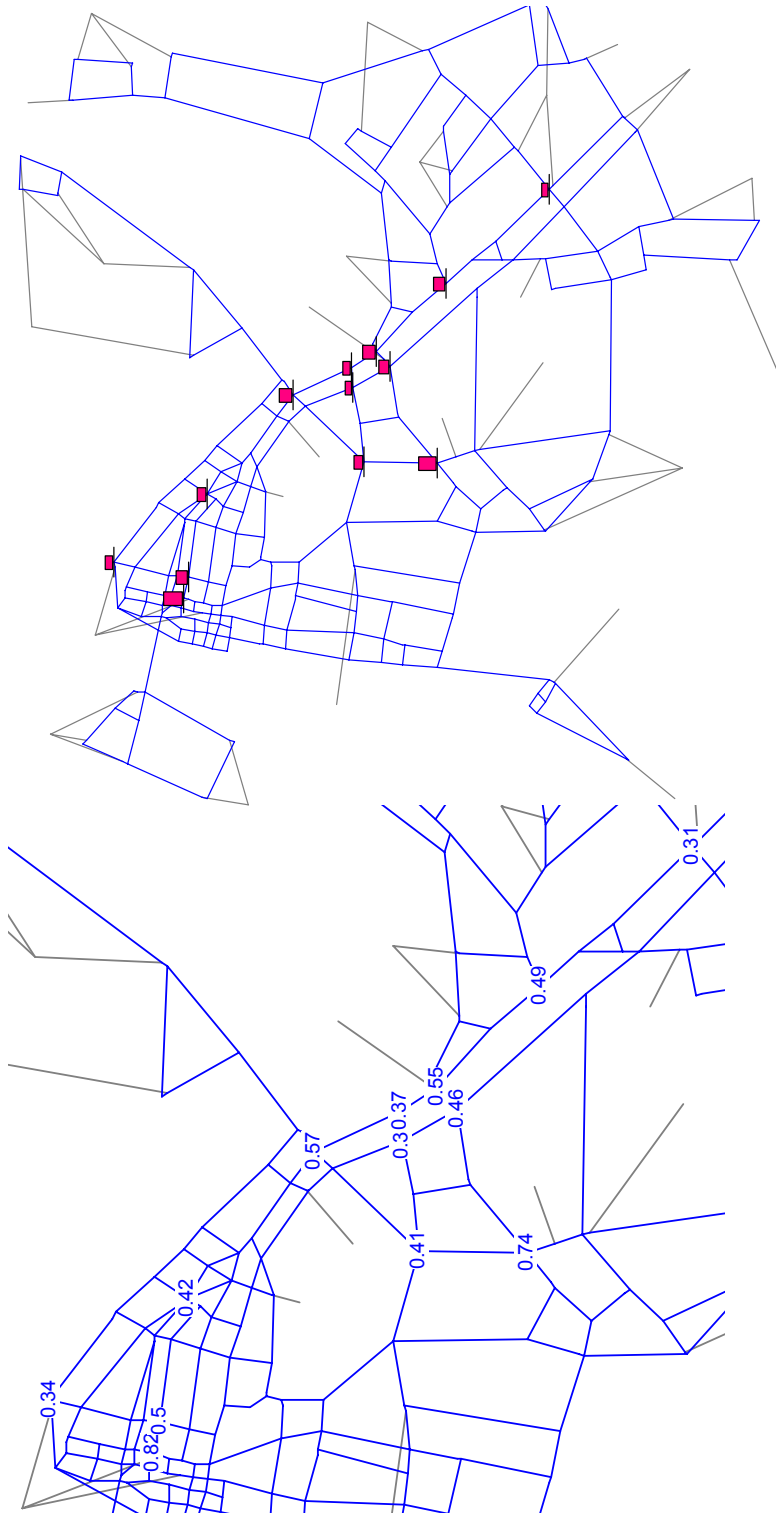


Figura 41. Grados de saturación superiores a 30% en la situación base

Fuente: Elaboración propia

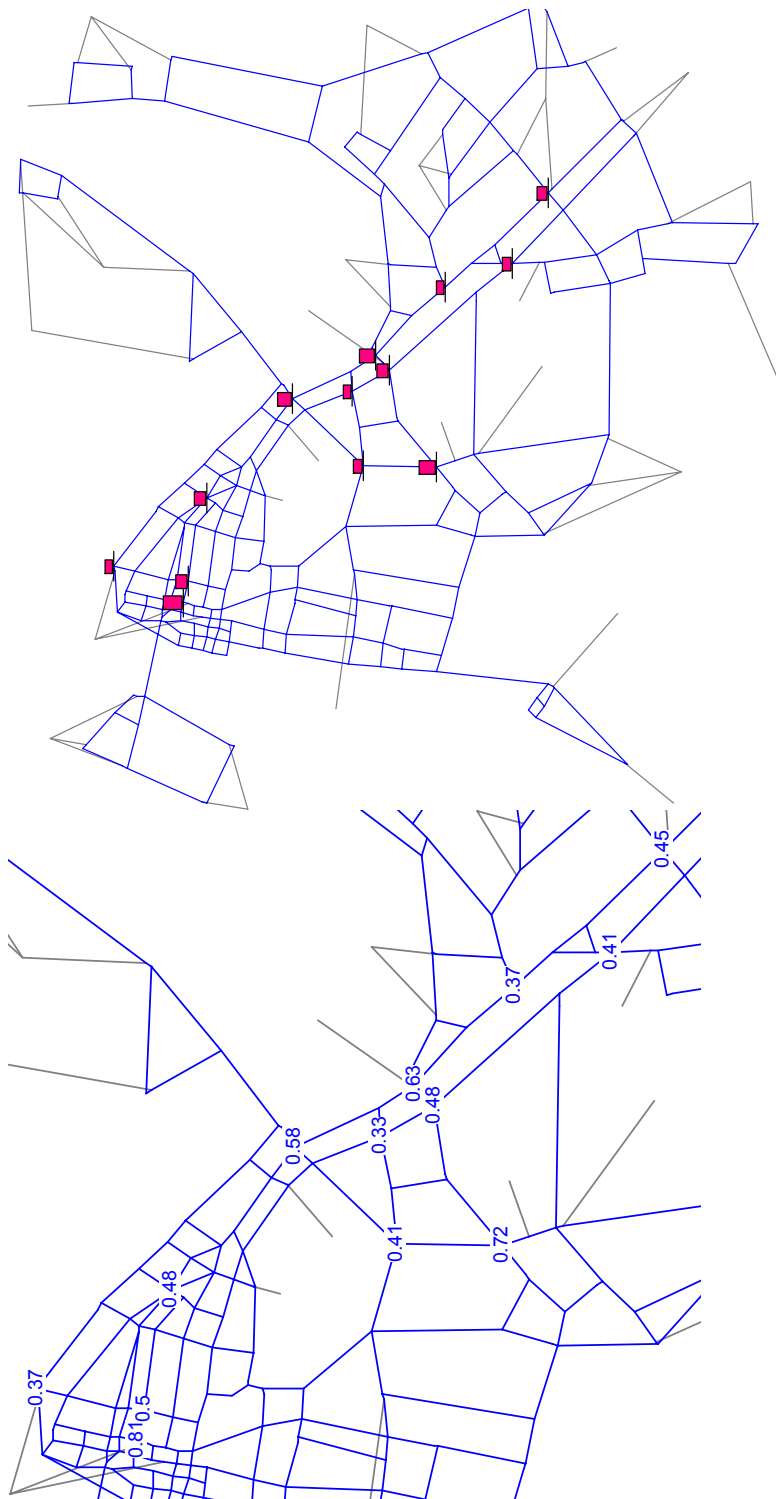


Figura 42. Grados de saturación superiores a 30% en la situación base

Fuente: Elaboración propia

d. Tiempo de viaje e índice de rendimiento

En la situación con vía reversible, al revisar los tiempos de los recorridos completos, para la mayoría de las líneas de transporte público aumentaron entre un 0,02% y un 7,27%. Sin embargo, al analizar el tiempo de recorrido en el trayecto de ida al centro separado del recorrido de vuelta se nota que de ida en promedio bajó un 3,73%, mientras que de vuelta aumentó en un 7,13%. Las líneas en que más creció o decreció el tiempo de recorrido, según el trayecto, fueron las que usaron, casi de manera completa, Picarte. Existen dos líneas de taxis colectivos

que tanto en el trayecto de ida como de vuelta aumentaron el tiempo de recorrido, pero estas líneas no usaban Picarte, sino calles alternativas para llegar al centro.

Analizando los tiempos de viaje en los corredores se revisó si las variaciones se muestran de manera más pronunciada en los arcos o en las intersecciones, pero se vio que tanto el tiempo en movimiento, como las demoras aumentaron de la misma forma, manteniéndose la proporción entre ellas.

Con la aplicación de la medida se lograron reducciones de un 19% en el tiempo de viaje del transporte público y de un 7% en el del transporte privado, en Picarte hacia el centro. Ya que los cambios en la partición modal fueron tan pequeños, no hubo cambios en los parámetros de demora y detenciones para el cálculo de velocidad del transporte público, por lo cual este modo se vio bastante beneficiado con la medida en el corredor.

En los demás corredores los mayores cambios se dieron en Errázuriz, debido a que esta calle es paralela a Picarte en todo el tramo donde se implementa la medida. En Errázuriz, en sentido del centro al sur-oriente, se produjo un aumento del tiempo de viaje de 19% para el transporte público y de 17% para el privado.

Para el transporte público y el transporte privado mejoraron las condiciones, ya que los tiempos promedio de viaje y distancias de recorrido, sí se vieron afectados. En el caso del transporte público, dado que la mayoría de las líneas usaron Picarte, y los viajes por ser punta mañana se dirigen más hacia el centro, el tiempo promedio de viaje disminuyó, en 1,2%. También es un factor importante que con el cambio en las líneas debido a la reversibilidad de Picarte, el uso de Errázuriz no supuso un aumento significativo en la distancia recorrida, por lo cual, el consumo de combustible sólo se vio afectado por los cambios en la velocidad.

Para el caso del transporte privado en la situación base se pudieron usar todas las vías, mientras que con la medida esto se restringió. La restricción hizo que aumentara la distancia promedio de viaje, con lo que también subió el consumo de combustible y esto se tradujo en un crecimiento del índice. También se presentó un pequeño incremento en el tiempo promedio de viaje, 0,03%, por los problemas de reruteo.

Debido a que hubo un cambio mínimo en la partición modal de la caminata y que el índice para este modo depende sólo de la distancia promedio de viaje, la variación que se presentó en este índice es muy pequeña. A continuación, se presentan los valores obtenidos de los índices de rendimiento para los distintos modos, en la hora punta mañana.

Tabla 22. Índices de rendimiento por modo y pasajero

	Situación base	Vías unidireccional
Índice caminata \$/h-pax	2,90	2,89
Índice transporte privado \$/h-pax	81,92	82,38
Índice transporte público \$/h-pax	150,76	148,54

La baja en el índice del transporte público logró compensar la subida del privado, con una reducción del índice total de 0,81%, pasando de \$2.542.927 a \$2.522.318 por hora. Dado que los cambios que se produjeron en los flujos son de carácter local, era de esperar que el índice de rendimiento de toda la ciudad no sufriera un cambio drástico.

6.2.2 Análisis con escenarios de vectores de atracción y generación de viajes

Para observar la influencia de la concentración de la atracción y generación de viajes se modelaron distintos escenarios, donde el total de viajes generados y atraídos es el mismo, pero cambia la proporción de los viajes en cada zona. Las zonas que más viajes atrajeron en la situación base son las del centro, mientras que las que más viajes generaron son las residenciales del sur-oriente.

Los escenarios se crearon modificando en los vectores de generación y atracción precisamente la concentración de viajes en estos dos grupos de zonas. Inicialmente estas zonas residenciales generaron el 23% de los viajes totales, mientras que el centro atrajo el 30%. Las variaciones que se hicieron fueron: cambiar la concentración de viajes haciendo que los viajes al centro fluctuaran entre 10% y 50%, mientras se dejó la atracción de viajes sin modificar. Después se varió la generación de viajes, haciendo que los viajes desde las zonas residenciales cambiaran entre 10% y 50% y se mantuvo la atracción de viajes inmodificada. Por último, se hizo una variación simultánea de la generación y atracción de viajes, haciendo que en cada escenario, tanto la atracción al centro como la generación de las zonas residenciales, fuera la misma y fluctuara entre 10% y 50%.

a. Distribución

Con los distintos escenarios de vectores origen y destino, no se logró determinar una tendencia clara, salvo cuando se variaron simultáneamente la generación y atracción. En general las variaciones rondaron el 1,5% para el total de viajes y los de estudio y el 2% para los de trabajo. En el caso de variaciones simultáneas en los vectores de generación y atracción se nota una tendencia a la disminución de la variación cuando existe mayor concentración de viajes. A continuación, se presenta el porcentaje de viajes que cambia el par origen destino para cada escenario tarifario, por propósito de viaje.

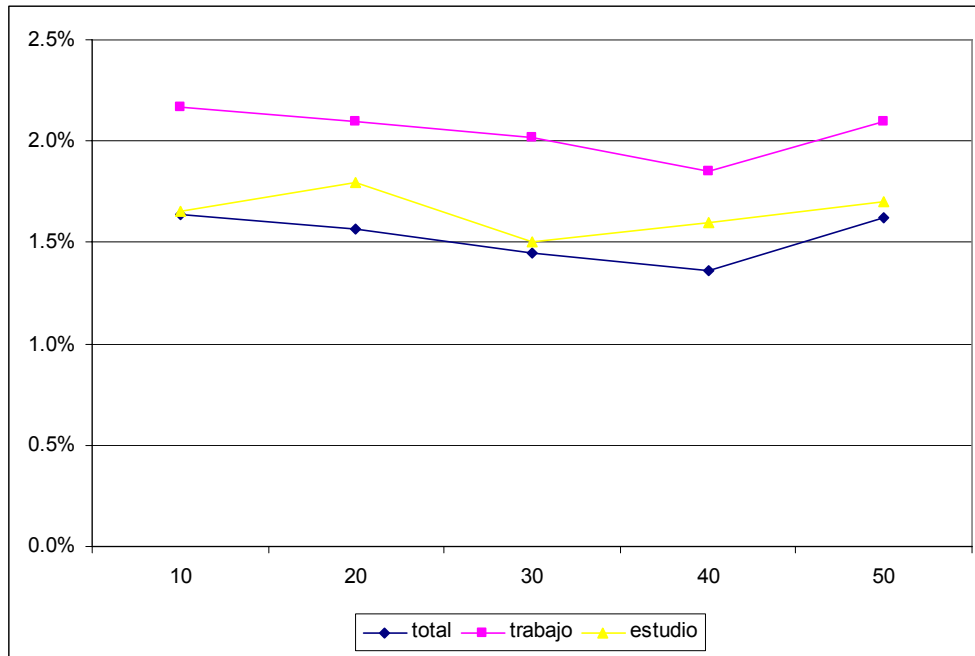


Figura 43. Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino, para los escenarios variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante

Fuente: Elaboración propia

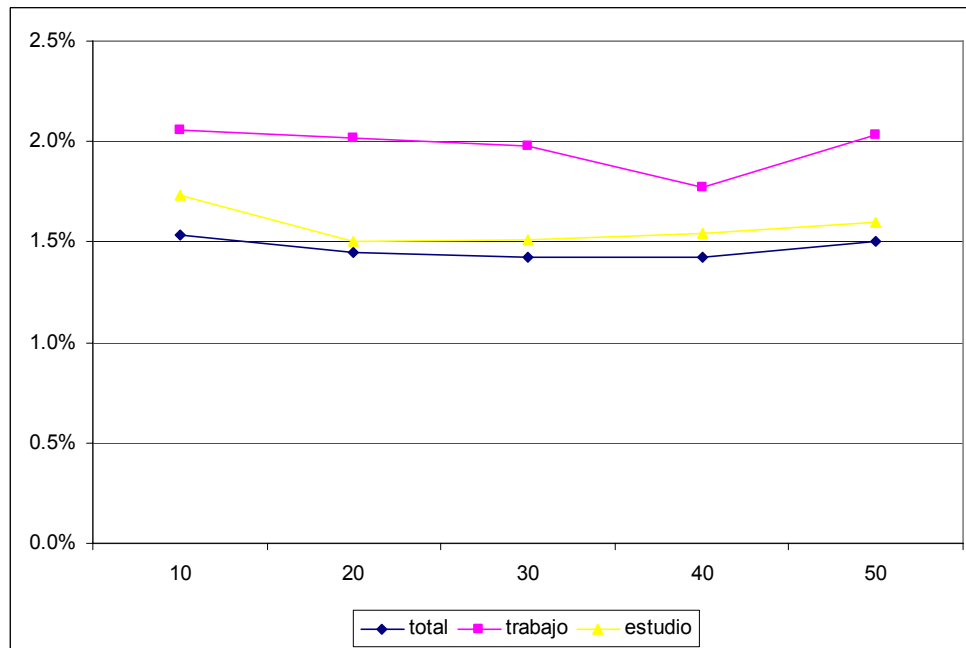


Figura 44. Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino, para los escenarios variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante

Fuente: Elaboración propia

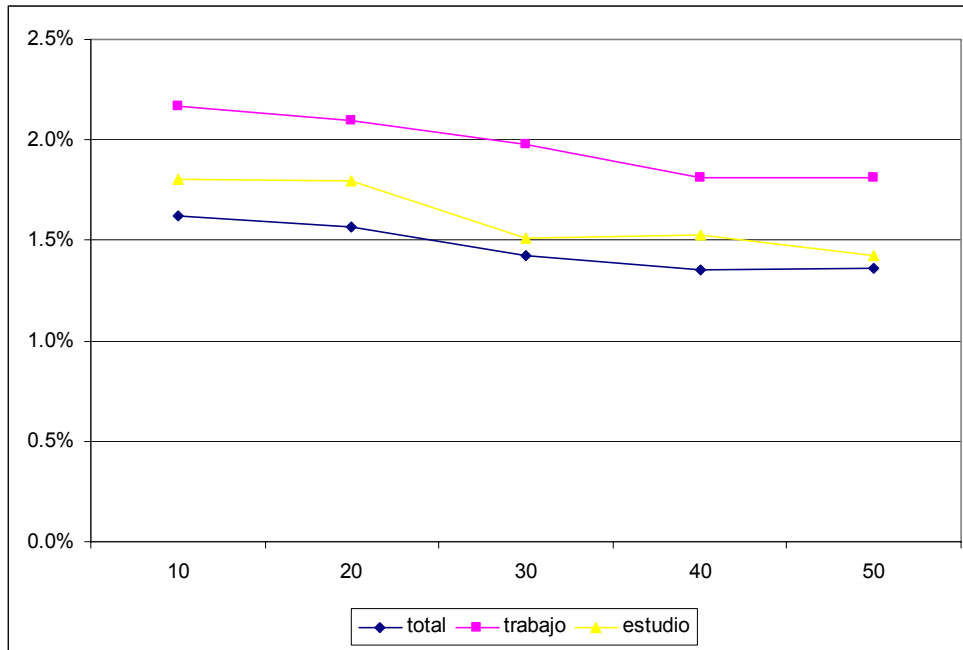


Figura 45. Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino, para los escenarios variación en la concentración de la atracción y generación de viajes

Fuente: Elaboración propia

b. Partición modal

En general los cambios de escenario no mostraron una gran influencia sobre la partición modal, ya que revisando los modos agrupados se lograron variaciones de menos del 2%. Con las variaciones en la concentración de generación de viajes en la zona residencial los efectos son aún menos pronunciados que cuando se hicieron cambios en la concentración de la atracción de viajes en el centro.

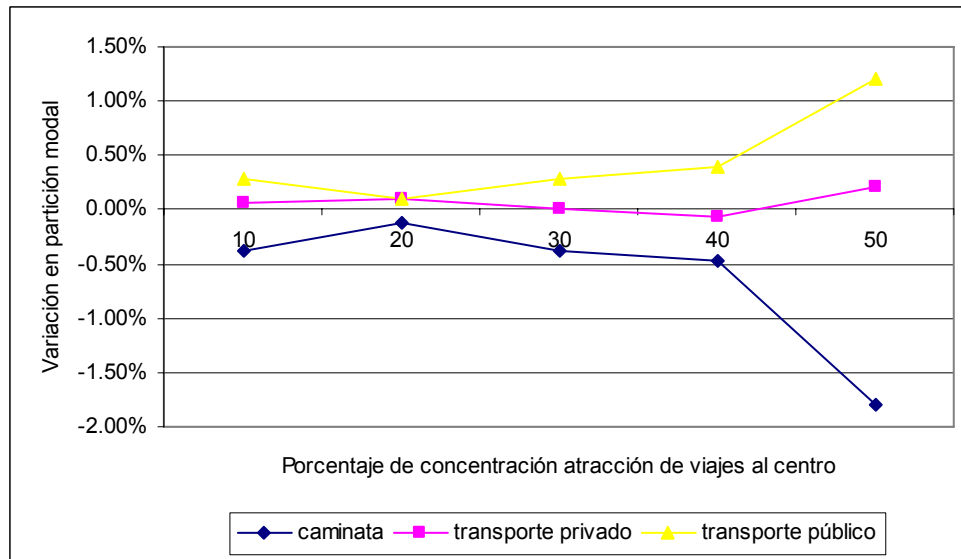


Figura 46. Diferencias en la partición modal agrupada, para los escenarios variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante

Fuente: Elaboración propia

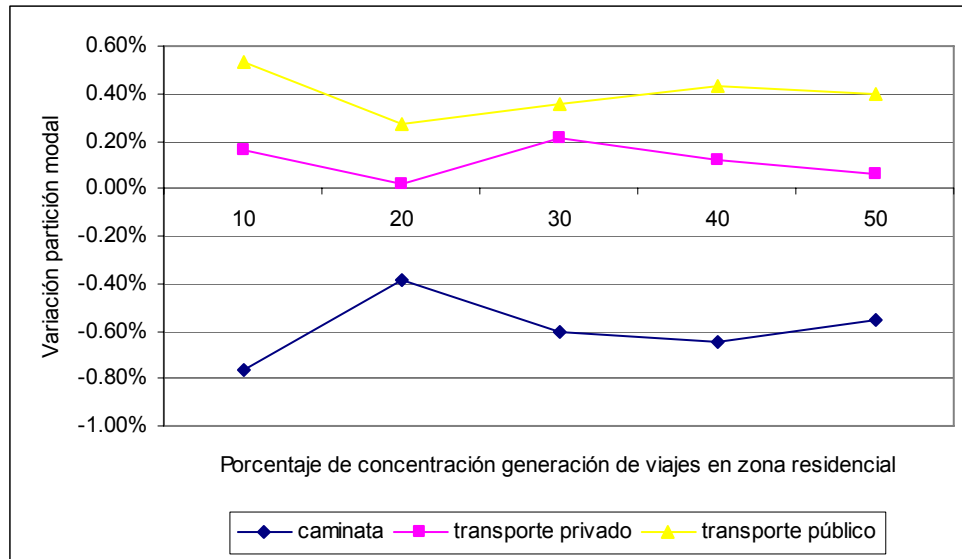


Figura 47. Diferencias en la participación modal agrupada, para los escenarios variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante

Fuente: Elaboración propia

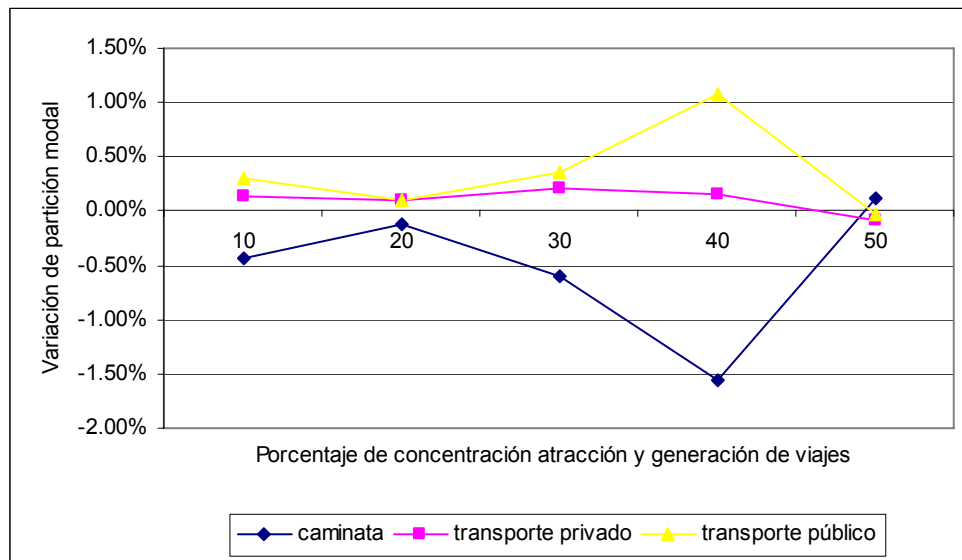


Figura 48. Diferencias en la participación modal agrupada, para los escenarios variación en la concentración de la atracción y generación de viajes

Fuente: Elaboración propia

Se observa que prácticamente en todos los casos las pequeñas variaciones favorecieron al transporte público sobre los otros modos, y dado que la medida afectó los costos de los modos motorizados de forma positiva, la caminata disminuyó su participación.

c. Asignación

Revisando los cambios en la asignación, se denota cierta tendencia a que una parte más amplia de la red se vea afectada cuando los escenarios tienen baja concentración de viajes, tanto en la atracción al centro como en la generación de las zonas residenciales, y disminuye con el aumento de la concentración de viajes. Esto se debe a que Picarte y Errázuriz son las

calles que comunican de forma más directa estos grupos de zonas y, cuando los viajes estuvieron más concentrados y Picarte se hace unidireccional, aunque aumente la congestión en Errázuriz, hacer un reruteo en los viajes entre estas zonas resultó con un tiempo de viaje mayor a ir por Errázuriz.

A continuación, se muestran las figuras con los cambios en la asignación para algunos de los escenarios con mayor y menor cambio.

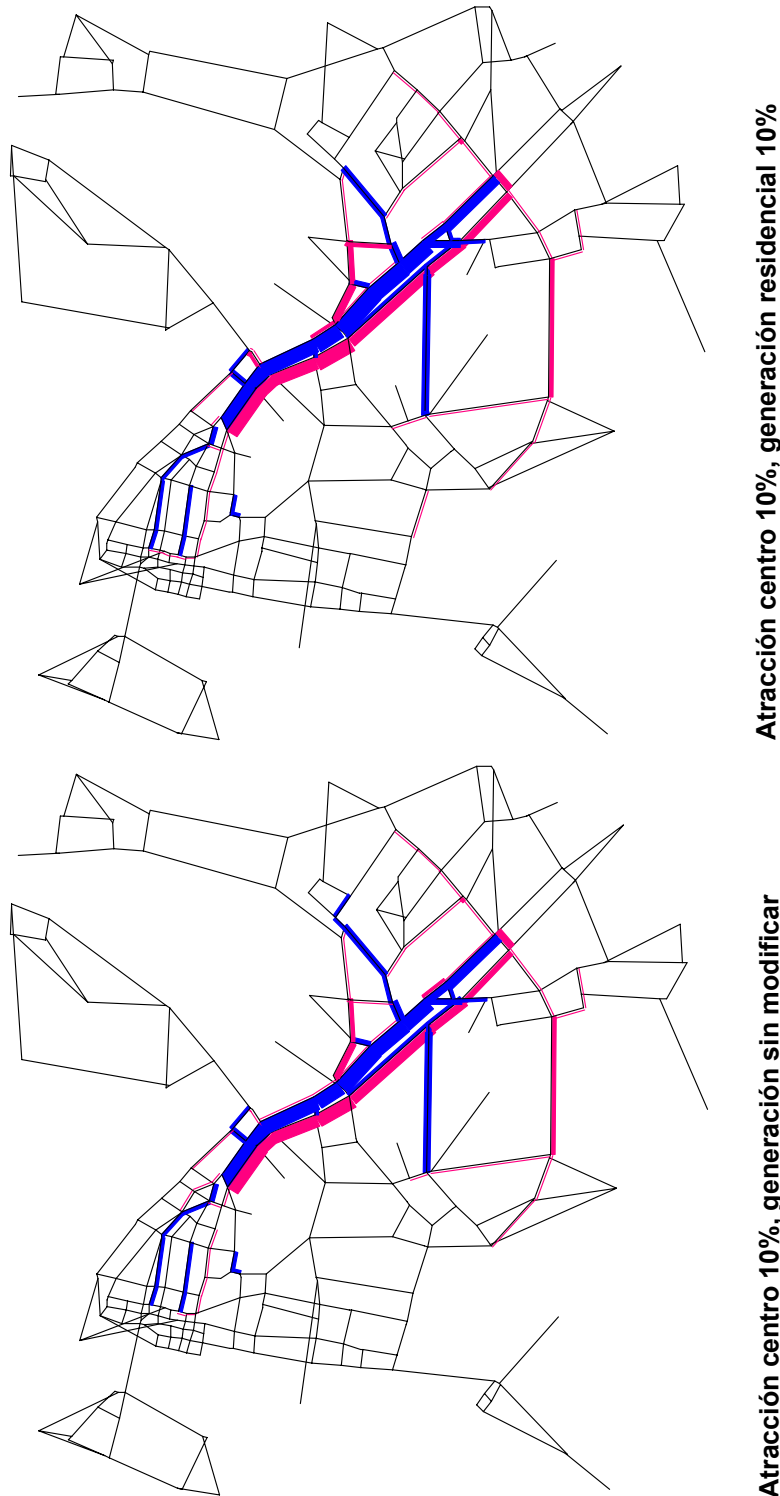
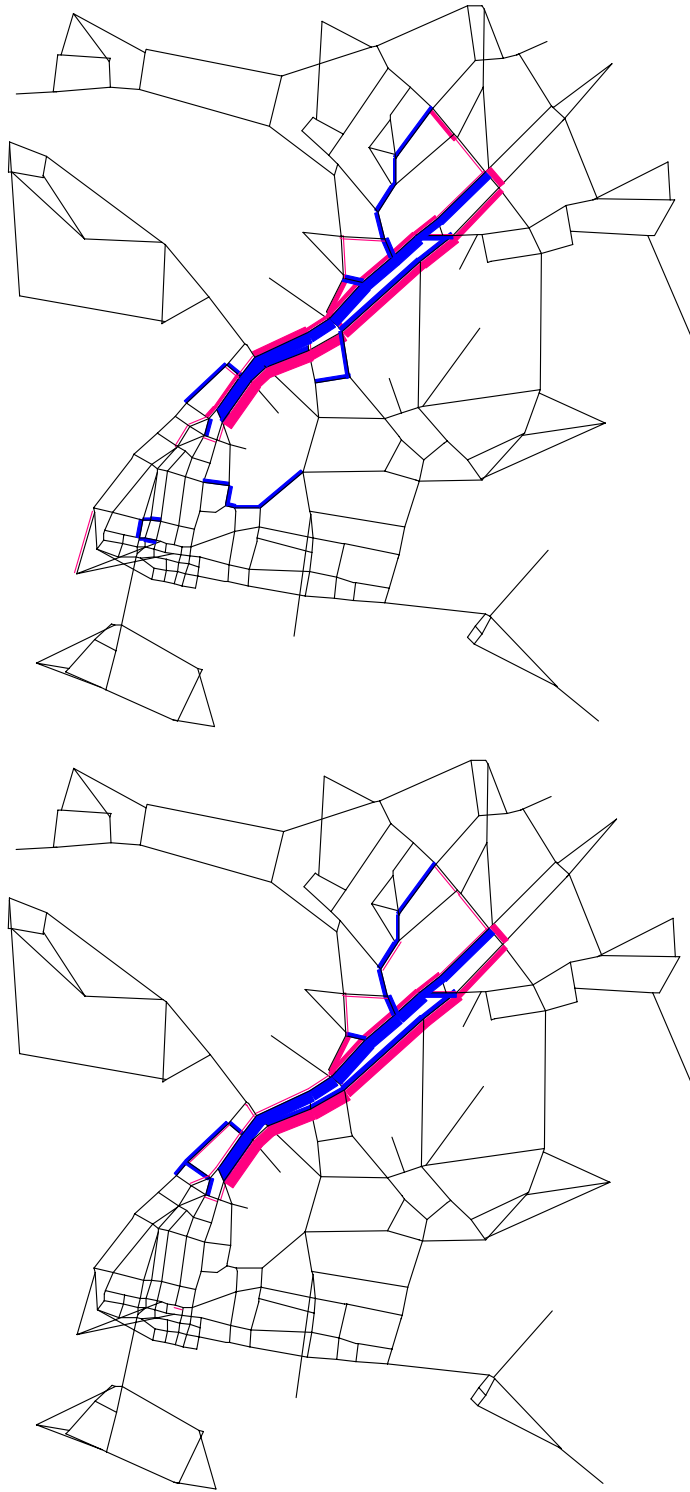


Figura 49. Cambios en la asignación de flujo a la red para los escenarios con mayores cambios

Fuente: Elaboración propia



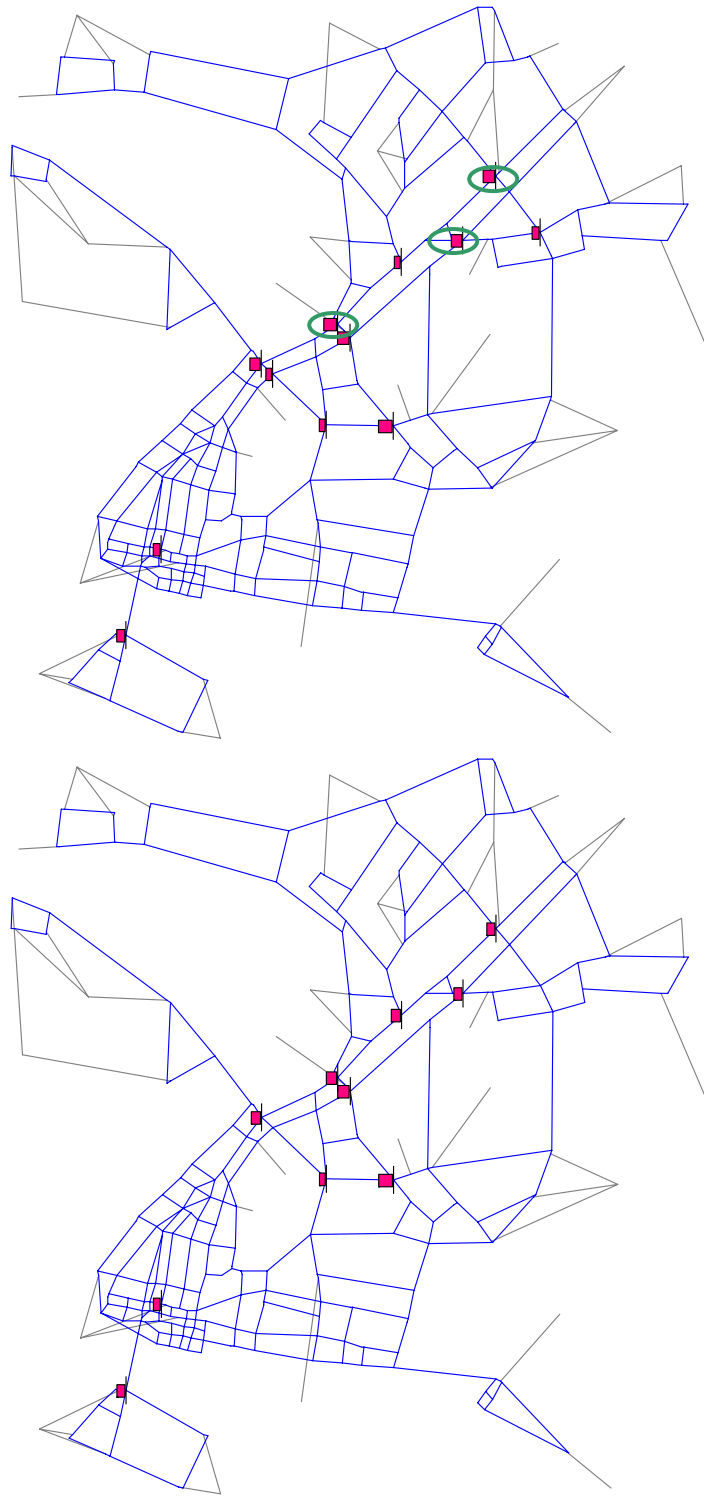
Atracción centro 50%, generación residencial 50%

Atracción sin modificar, generación residencial 50%

Figura 50. Cambios en la asignación de flujo a la red para los escenarios con mayores cambios

Fuente: Elaboración propia

Aunque existe una modificación en la asignación de flujo, los cambios en los grados de saturación máximos de las intersecciones, no tuvieron grandes variaciones entre escenarios. En todos los casos hubo un aumento en el grado de saturación en las mismas intersecciones, y el aumento fue parecido. En las siguientes figuras se destacan estas intersecciones en los círculos verdes y se nota que los grados de saturación son sensibles a la proporción de viajes al centro, teniendo menos intersecciones con grados de saturación mayor a 30% cuando la concentración es baja.

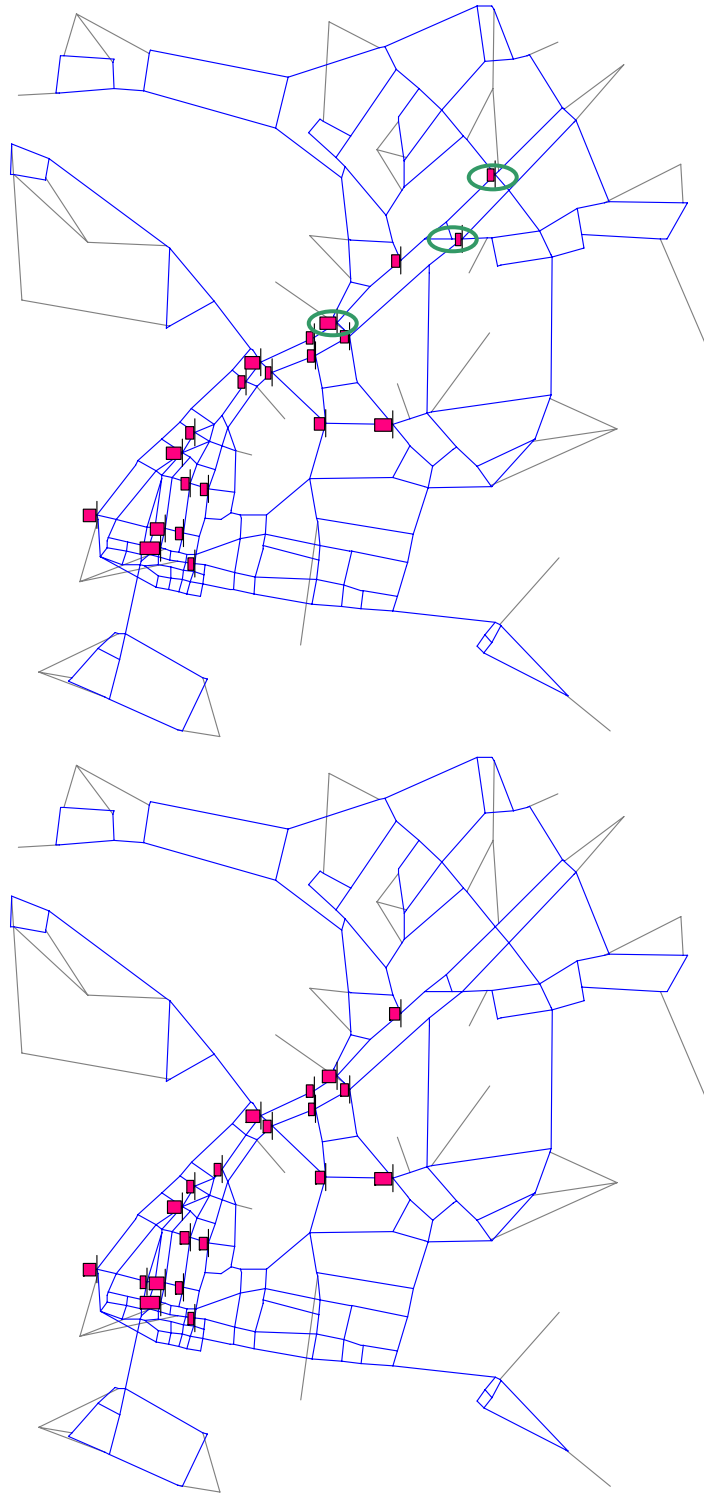


Situación base

Con vía unidireccional

Figura 51. Grados de saturación superiores a 30% para el escenario de atracción al centro en 10% y generación sin modificar

Fuente: Elaboración propia



Situación base

Con vía unidireccional

Figura 52. Grados de saturación superiores a 30% para el escenario de atracción al centro en 10% y generación sin modificar

Fuente: Elaboración propia

d. Tiempo de viaje e índice de rendimiento

Respecto a los tiempos de viaje de toda la ciudad hubo pequeñas variaciones, tanto para el transporte público como para el privado. El transporte público siempre tuvo una baja en el tiempo de viaje promedio, debido principalmente, a que la mayoría de las líneas de transporte público usaron Picarte y, dado que en el periodo modelado, la mayoría de los viajes fueron en

dirección al centro, son menos los viajes que se vieron perjudicados por el reruteo del transporte público a Errázuriz (Figura 53). Existió una tendencia a que la variación en los tiempos de viaje aumentara con la concentración de viajes.

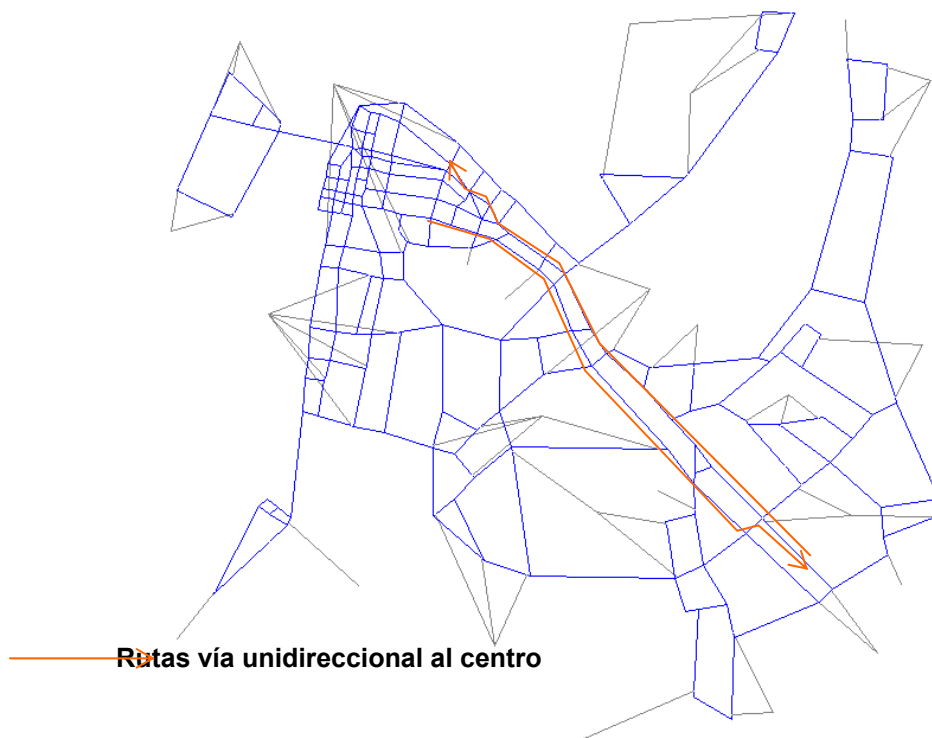


Figura 53. Reruteos transporte público

Fuente: Elaboración propia

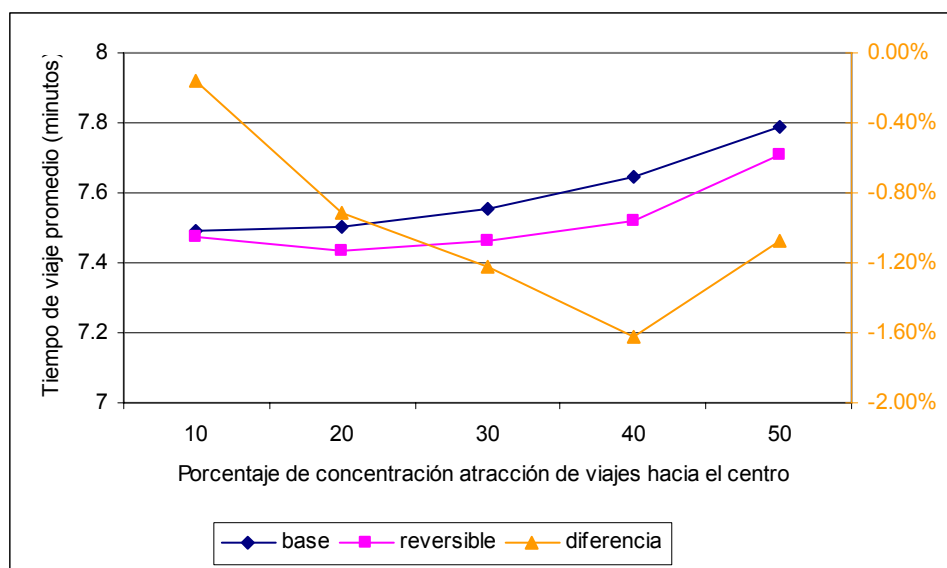


Figura 54. Tiempo de viaje promedio en transporte público, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante

Fuente: Elaboración propia

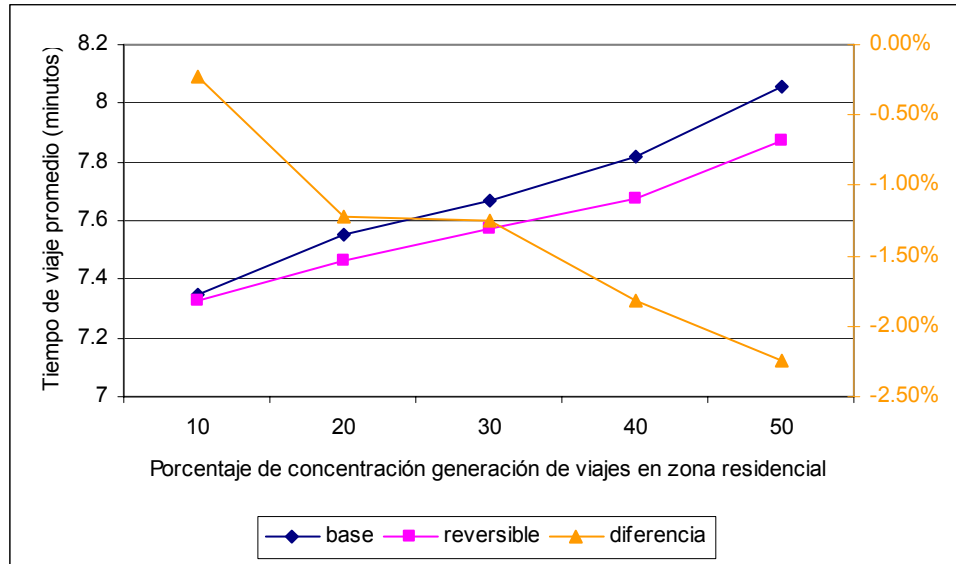


Figura 55. Tiempo de viaje promedio en transporte público, para los escenarios con variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante

Fuente: Elaboración propia

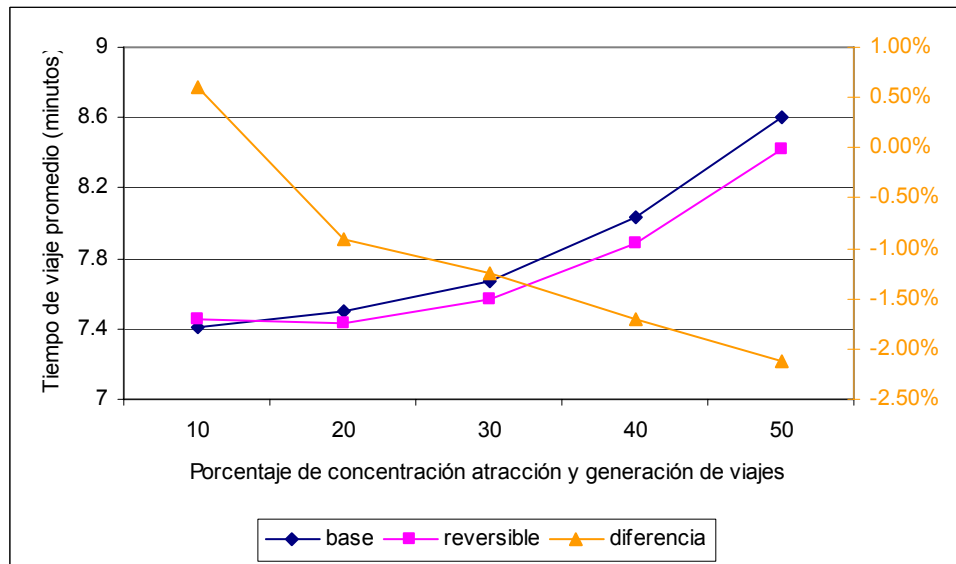


Figura 56. Tiempo de viaje promedio en transporte público, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción y generación de viajes

Fuente: Elaboración propia

El transporte privado no resultó tan beneficiado, ya que en varios escenarios el tiempo promedio de viaje aumentó. Se puede establecer una tendencia a que a mayor concentración de viajes en el centro y la zona residencial se logró una disminución del tiempo de viaje promedio con la medida. Sin embargo, esta tendencia presenta una excepción cuando se mantuvo la generación constante y se hizo la concentración del 50% de la atracción en el centro, ya que en este caso aumentó el tiempo de viaje promedio.

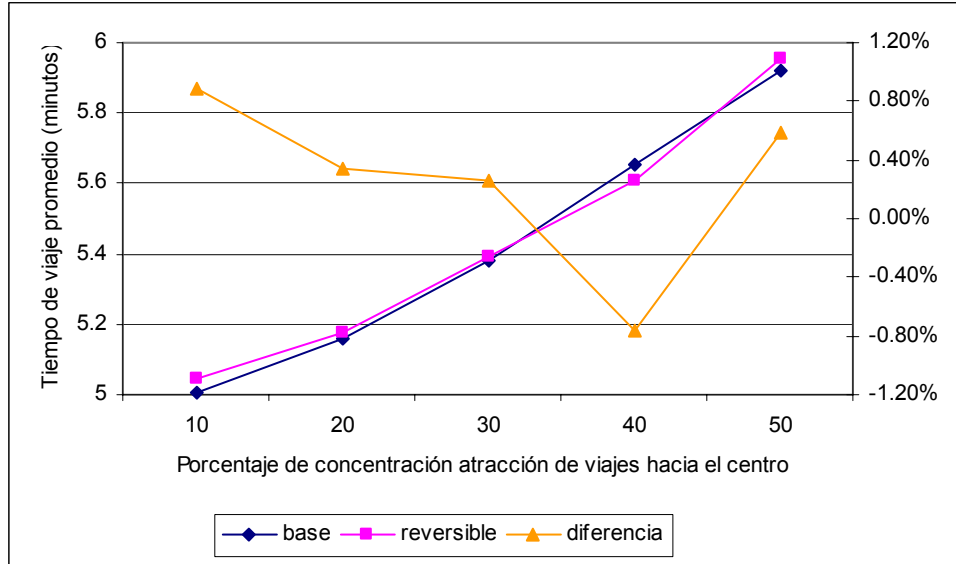


Figura 57. Tiempo de viaje promedio en transporte privado, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante

Fuente: Elaboración propia

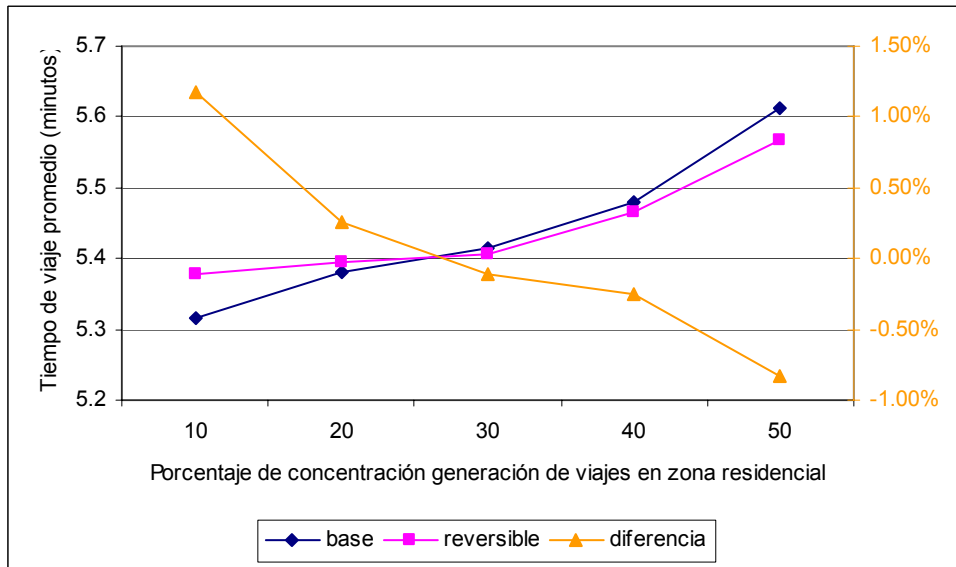


Figura 58. Tiempo de viaje promedio en transporte privado, para los escenarios con variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante

Fuente: Elaboración propia

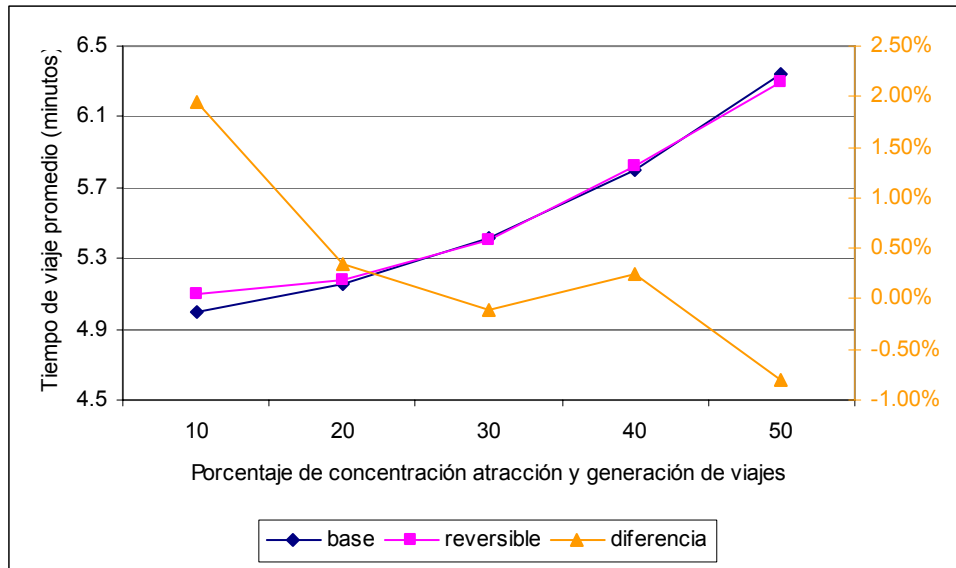


Figura 59. Tiempo de viaje promedio en transporte privado, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción y generación de viajes

Fuente: Elaboración propia

Si bien para el transporte público y privado se distingue cierta tendencia, las disminuciones fueron bajas cuando se analizaron el tiempo de viaje promedio de toda la ciudad, con variaciones de menos del 2,5%. Cuando se revisaron los tiempos de viaje en los corredores más afectados, Picarte en sentido oriente-poniente y Errázuriz en sentido poniente-oriente, se pudo ver que no afectó mucho el escenario de concentración de viajes, y en todos los casos hubo una disminución de 23% en Picarte y un aumento del 18% en Errázuriz.

En general la variación en índices de rendimiento, por modo por pasajero, tiende a ser menor con la concentración de los viajes. Esto fue más evidente en el caso del transporte público, donde además, la medida siempre presentó una mejora en el índice de rendimiento. Para la caminata cuando la concentración de viajes fue muy baja, ya sea en el origen o en el destino, la medida aumentó el índice de rendimiento por persona. Para el transporte privado la medida pocas veces logró ser positiva y disminuyó el índice de rendimiento. Estos resultados fueron muy coherentes con los tiempos de viajes antes presentados.

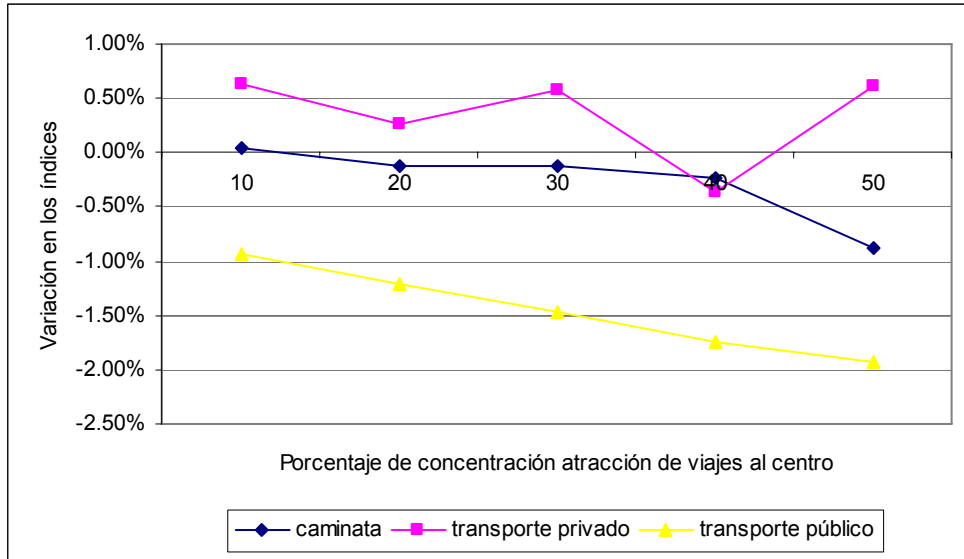


Figura 60. Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante

Fuente: Elaboración propia

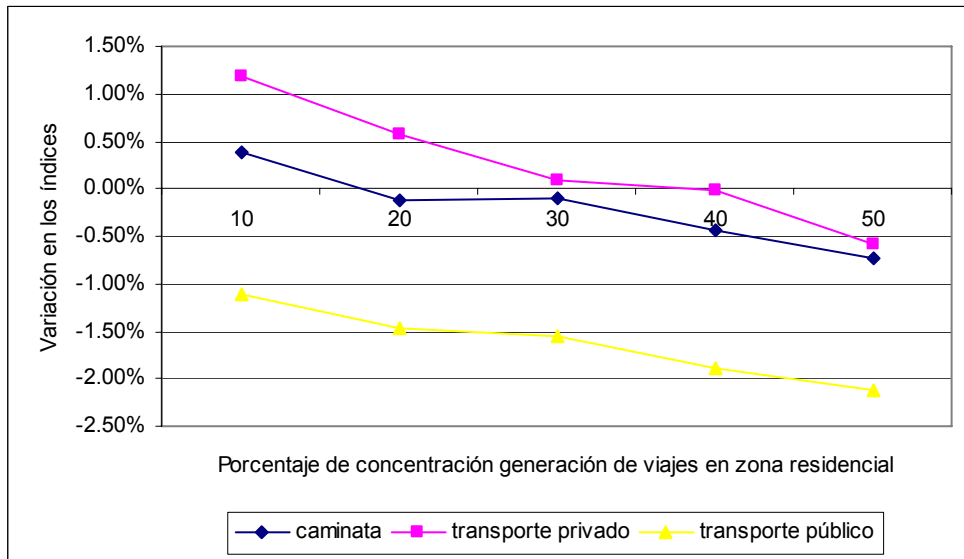


Figura 61. Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero, para los escenarios con variación en la concentración de la generación de viajes, manteniendo la atracción constante

Fuente: Elaboración propia

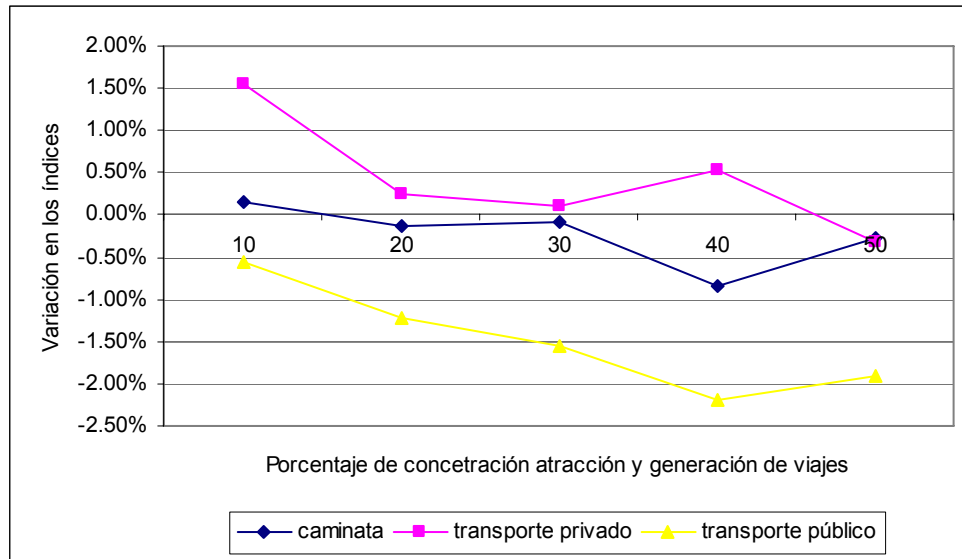


Figura 62. Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción y generación de viajes

Fuente: Elaboración propia

Revisando el índice de rendimiento total podemos decir que: con la excepción del escenario donde se tiene una baja concentración —tanto en los viajes originados en la zona residencial como de los atraídos por el centro—, la medida siempre resultó beneficiosa. La tendencia de crecimiento de los beneficios con la concentración de los viajes no fue clara cuando se revisaron los escenarios con variación en la concentración de viajes atraídos por el centro, ya que cuando esto llegó a 50% esta tendencia cambia. En el resto de escenarios sí se presentó una tendencia a aumentar la diferencia en el índice de rendimiento total con la mayor concentración de los viajes.

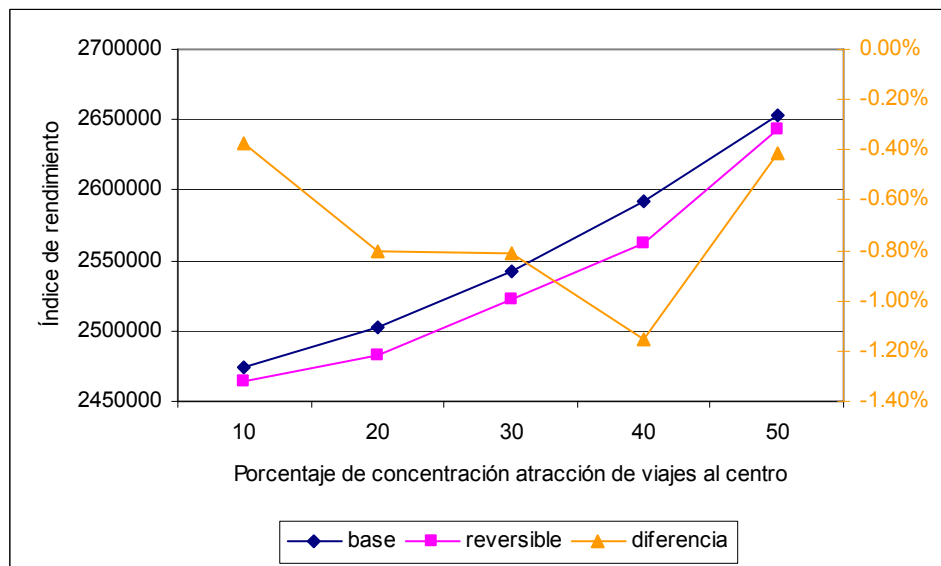


Figura 63. Índice de rendimiento total (\$/h), para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante

Fuente: Elaboración propia

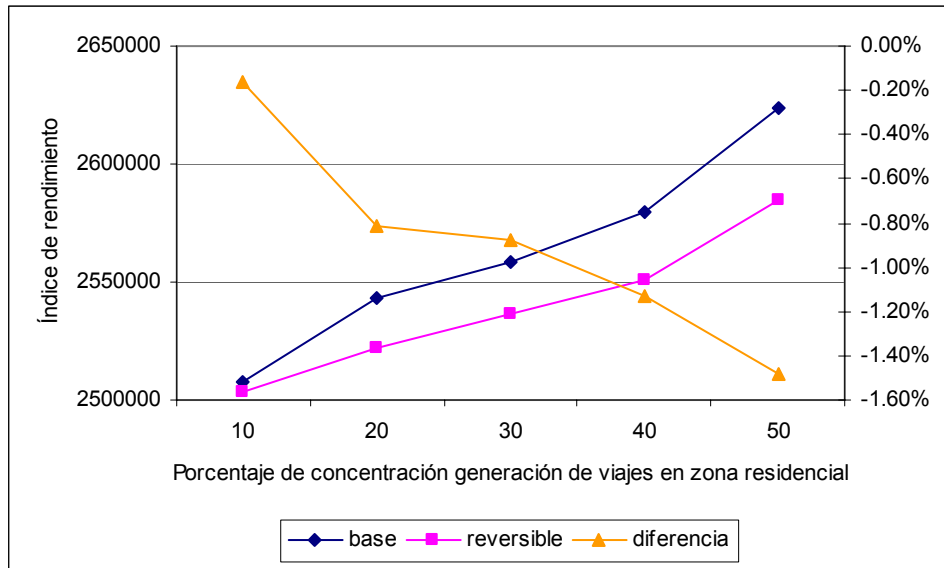


Figura 64. Diferencias del índice de rendimiento total, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante

Fuente: Elaboración propia

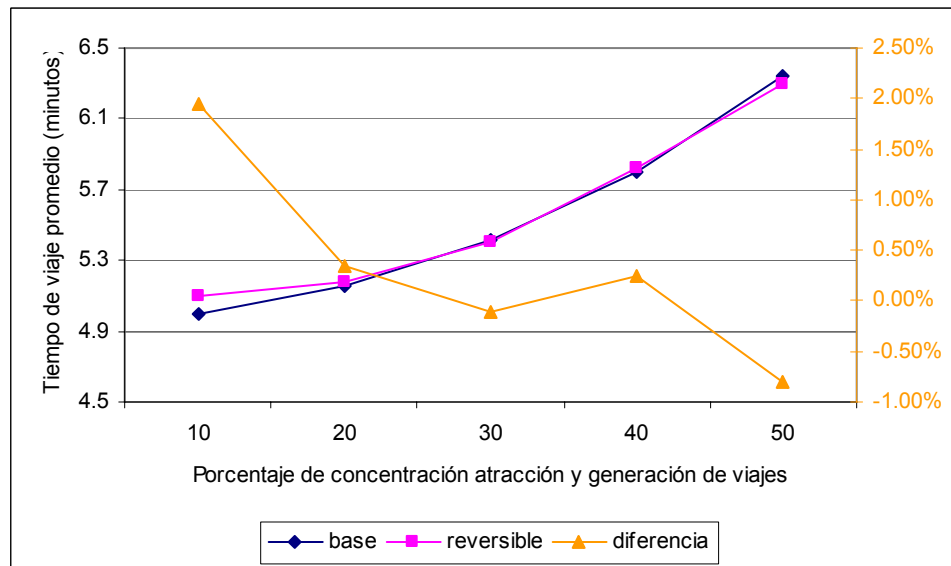


Figura 65. Diferencias del índice de rendimiento total, para los escenarios con variación en la concentración de la atracción de viajes, manteniendo la generación constante

Fuente: Elaboración propia

Como parte de los objetivos se planteó hacer una comparación entre lo reportado en la literatura y los resultados obtenidos.

No se encontró en la literatura revisada reportes de los impactos en la demanda de tráfico por la implementación de vías reversibles. Uno de los motivos puede ser porque no logra tener un impacto relevante. En los experimentos realizados no se encontró que hubiese un impacto sobre la demanda de tráfico, no hubo cambios significativos en la partición modal o en la distribución.

6.3 TARIFICACIÓN VIAL EN UNA ZONA

La zona que se eligió para hacer la modelación de tarificación es la zona centro, dado que es la que mayor cantidad de viajes atrae. Para modelarla se puso un costo adicional al transporte privado para cualquier tipo de intervención (sólo cruzar por la zona o ingresar a ella como destino).

a. Distribución

Al comparar las matrices de distribución de los viajes se observó cierta estabilidad en el porcentaje de los viajes que modificaron su par origen-destino respecto de la tarifa. Si bien se verificó un leve aumento en la variación con las tarifas más bajas, se estabilizaron en porcentajes muy parecidos rápidamente. Los valores en que fluctuaron estas variaciones están alrededor de 2% para el total de viaje y con propósito estudio, y un 2,8% de los que van al trabajo. A continuación, se presenta el porcentaje de viajes que cambia el par origen-destino para cada escenario tarifario, por propósito de viaje.

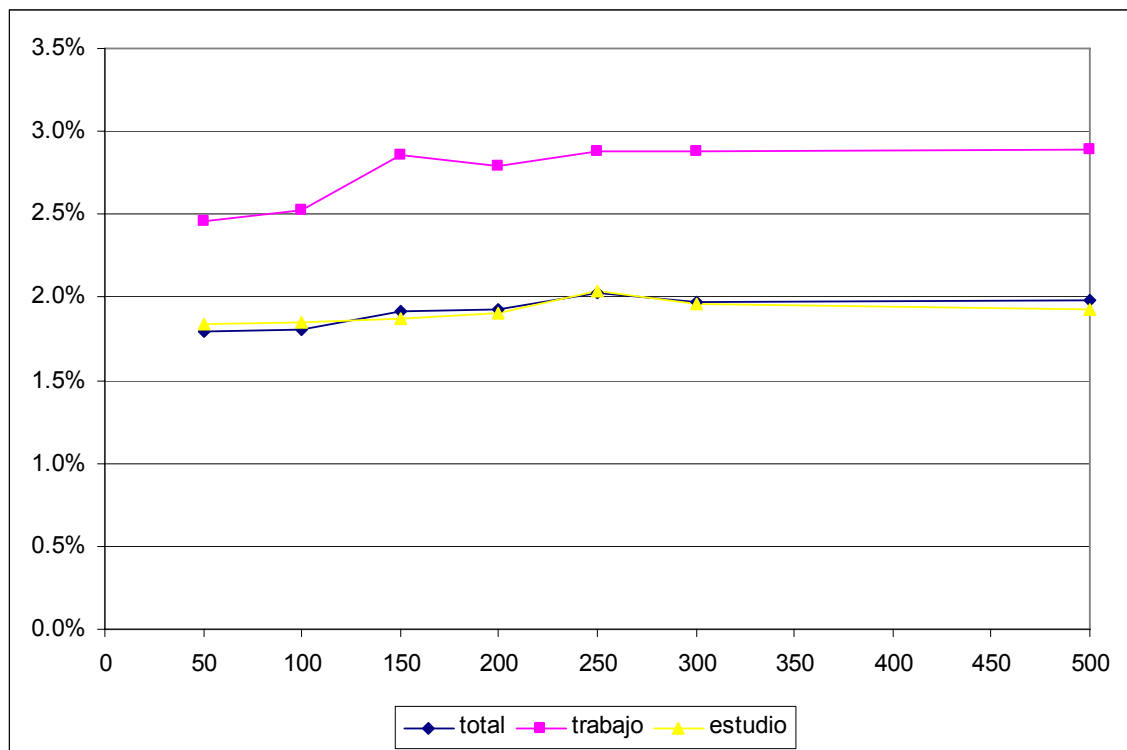


Figura 66. Porcentaje de viajes que cambian el par origen destino en cada escenario tarifario

Fuente: Elaboración propia

b. Partición modal

Analizando los resultados de la modelación de la medida se observó que se presentaron cambios en la partición modal, si bien cuando se analizaron en toda la ciudad éstos no fueron tan drásticos, en los modos de auto privado con una tarifa de \$50 disminuyeron entre 1 y 3 puntos porcentuales, llegando a una disminución de más de 5 puntos porcentuales con la máxima tarifa modelada.

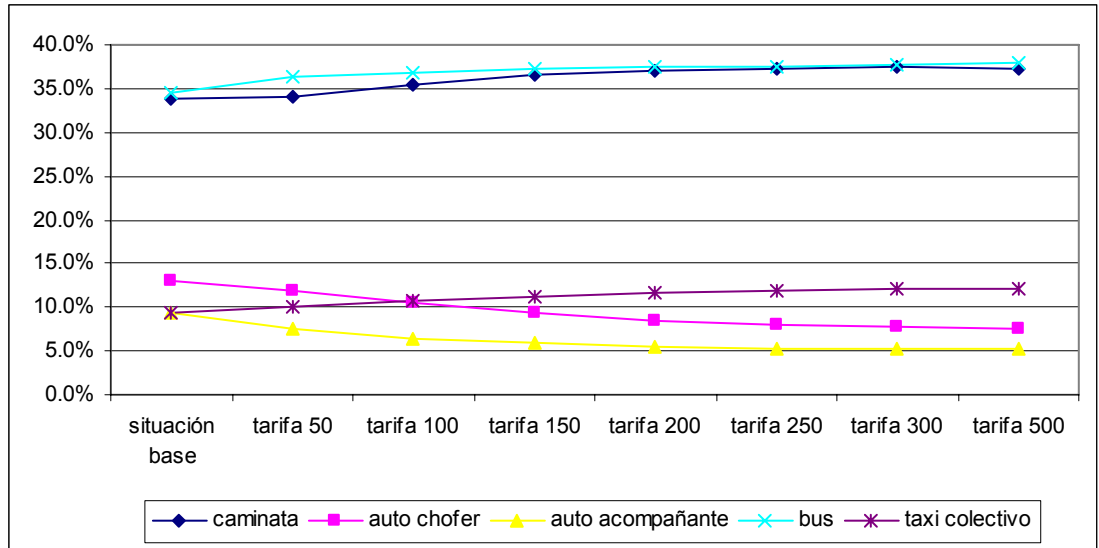


Figura 67. Partición modal, para todos los escenarios, viajes en toda la ciudad

Fuente: Elaboración propia

Las variaciones más fuertes se notaron cuando se revisaron sólo los viajes que llegan al centro, ya que esta es precisamente la zona afectada por la tarificación. En este caso los modos privados disminuyeron entre un 24% y 42% con la tarifa que dobla el costo promedio de viaje en auto (\$50), hasta un 100% con la tarifa máxima, mientras los demás modos aumentaron entre un 5% y 11% con la tarifa mínima hasta entre 17% y más de 34% con la tarifa de \$500 (10 veces el costo promedio del auto).

A continuación, se presentan la partición modal para los viajes que llegan al centro, pero esta vez usando la tarifa como el porcentaje en que se aumentó el costo promedio de viaje para el auto.

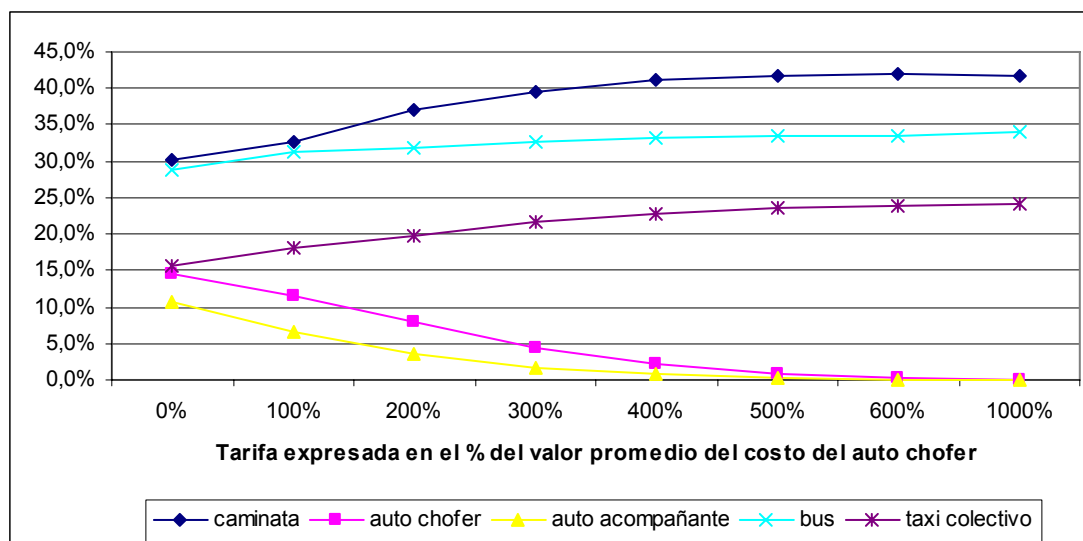


Figura 68. Partición modal, para todos los escenarios, viajes hacia la zona centro

Fuente: Elaboración propia

Como el costo por usar el auto aumentó con la medida, es claro que esto produjo el cambio a modos más económicos, en términos de su costo generalizado. Dentro de los modos de transporte público el taxi colectivo tuvo un aumento mucho mayor al del bus, esto se debió a que hay zonas por las que pasan más líneas de taxis colectivos, y su tiempo de espera fue menor al del bus.

Inclusive, con tarifas pequeñas -aproximadamente un tercio de la tarifa del transporte público-, se presentaron cambios relevantes en la partición modal. Si bien estos resultados pueden parecer poco realistas, es importante incorporar al análisis la elasticidad precio de la demanda del modelo y además, tener en consideración el bajo costo promedio de viaje del modo auto chofer.

Para incorporar lo anterior se calculó la elasticidad precio de la demanda para el modo auto chofer en el modelo usado, y además, se hizo el mismo cálculo para los modelos de otras ciudades intermedias: Osorno (CIS, 1998a), Temuco (CITRA LTDA, 1998) y Puerto Montt (SUROESTE Consultores, 2000). A continuación, se presentan los resultados de estos cálculos y los valores subjetivos del tiempo promedio (en \$ de 1996), que también aportaron en el análisis.

Tabla 23. Elasticidades y valores subjetivos del tiempo para distintas ciudades

	Elasticidad	VST (\$/hora)
Experimento	0,342	336
Osorno	0,377	402
Temuco	0,034	1566
Puerto Montt	0,096	1050

Fuente: Elaboración propia

Estos valores muestran que hubo una diferencia importante entre las variables para el modelo del experimento y las variables de Temuco y Puerto Montt, pero no así con las de Osorno. Para explicar estas diferencias se observan principalmente dos posibilidades. Las dos

primeras son ciudades más grandes que Osorno o Valdivia, y podrían tener un valor del tiempo mayor, pero esto no justifica que las diferencias sean tan grandes. Los modelos de Valdivia y Osorno fueron calibrados por el mismo consultor en el mismo año, y se puede suponer que exista un error metodológico que haya llevado al cálculo de un valor subjetivo del tiempo más bajo.

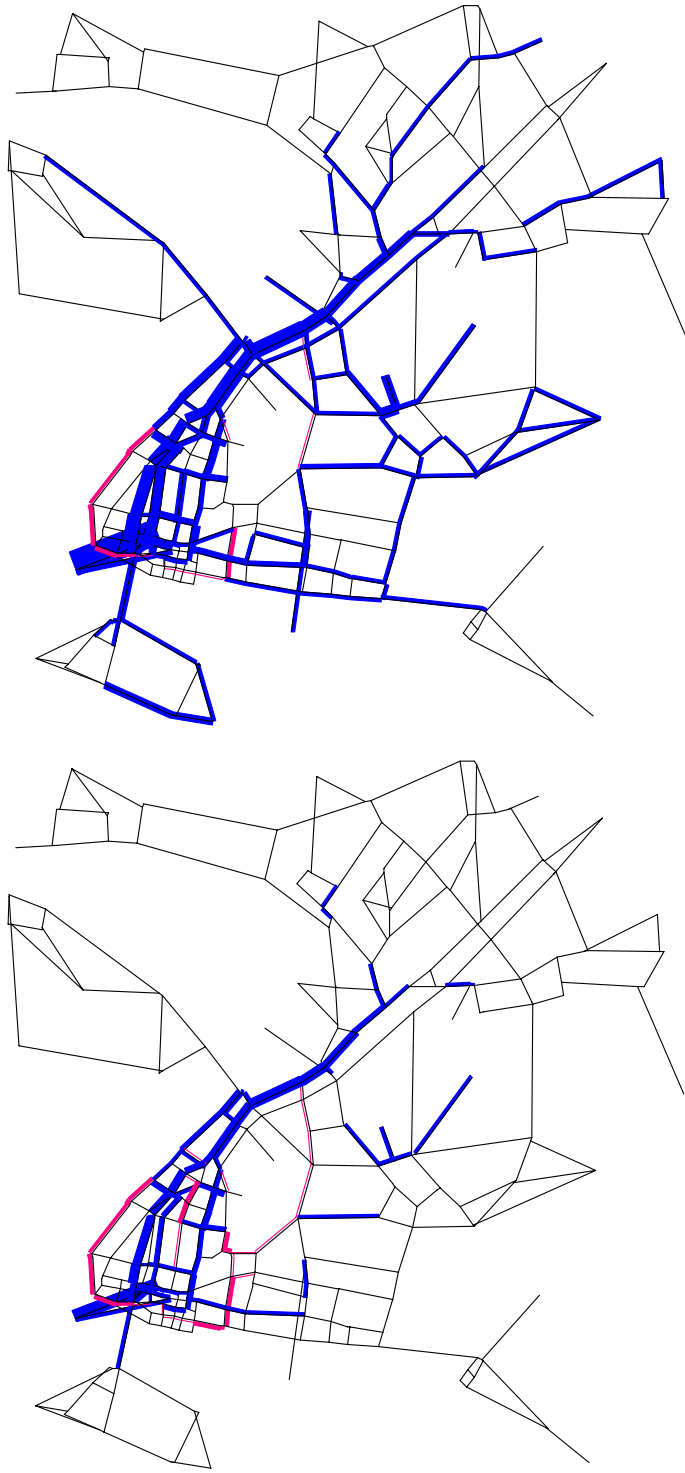
Como una referencia adicional se puede tener el valor subjetivo del tiempo para estudios urbanos que usa MIDEPLAN y que expresado en pesos de 1996 es de \$565,20. Haciendo la comparación con este valor se reconoce que los valores del tiempo del experimento y Osorno están un poco por debajo del contexto chileno.

El que los resultados aparezcan como exagerados se debe entonces, a la combinación de dos variables bajas: el costo del viaje para el auto chofer y el valor del tiempo usado en la modelación. A pesar de que, los mismos fueron afectados por un valor del tiempo bajo, se puede concluir que en ciudades intermedias, sin grandes problemas de congestión, medidas como la de tarificación vial pueden reportar modificaciones importantes en el sistema de transporte, incluso con tarifas bajas.

c. Asignación

Con la aplicación de la medida en general hubo disminución de flujo en las calles, sin embargo, existen algunas calles donde el flujo aumentó, especialmente en el anillo que rodea la zona centro, libre de pago.

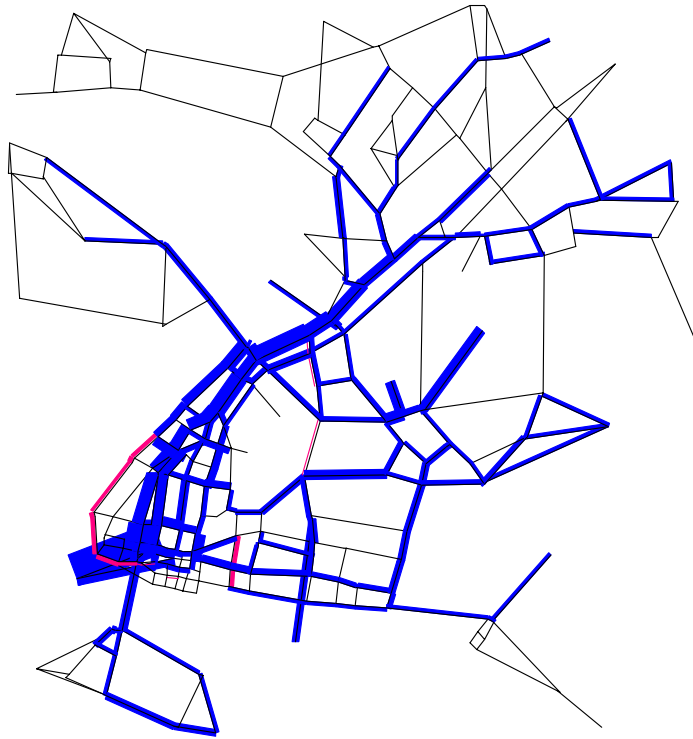
En las calles donde disminuyó el flujo, se alcanzó una reducción del tiempo de viaje de hasta 9%, mientras que, en las calles donde el flujo aumentó, el tiempo no lo hizo en más de un 3%, con la tarifa de \$50. Con tarifas superiores a los \$50 sólo hay una calle donde se mantuvo el aumento en el tiempo de viaje, de sólo 3%. Las disminuciones en el tiempo de viaje en los demás corredores fueron aumentando, con la tarifa, aunque de manera menos pronunciada, hasta la tarifa de \$200, entre \$200 y \$300 los tiempos de viaje permanecieron prácticamente iguales, y hubo una disminución en algunos con la tarifa de \$500.



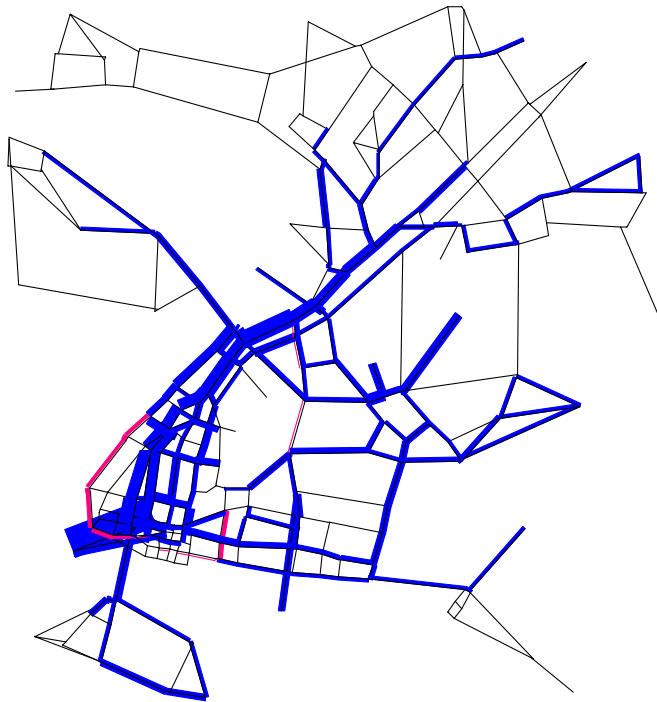
Tarifa de \$50

Tarifa de \$150

Figura 69. Cambios en la asignación de flujo a la red entre la situación base y distintos escenarios
Fuente: Elaboración propia



Tarifa de \$500



Tarifa de \$250

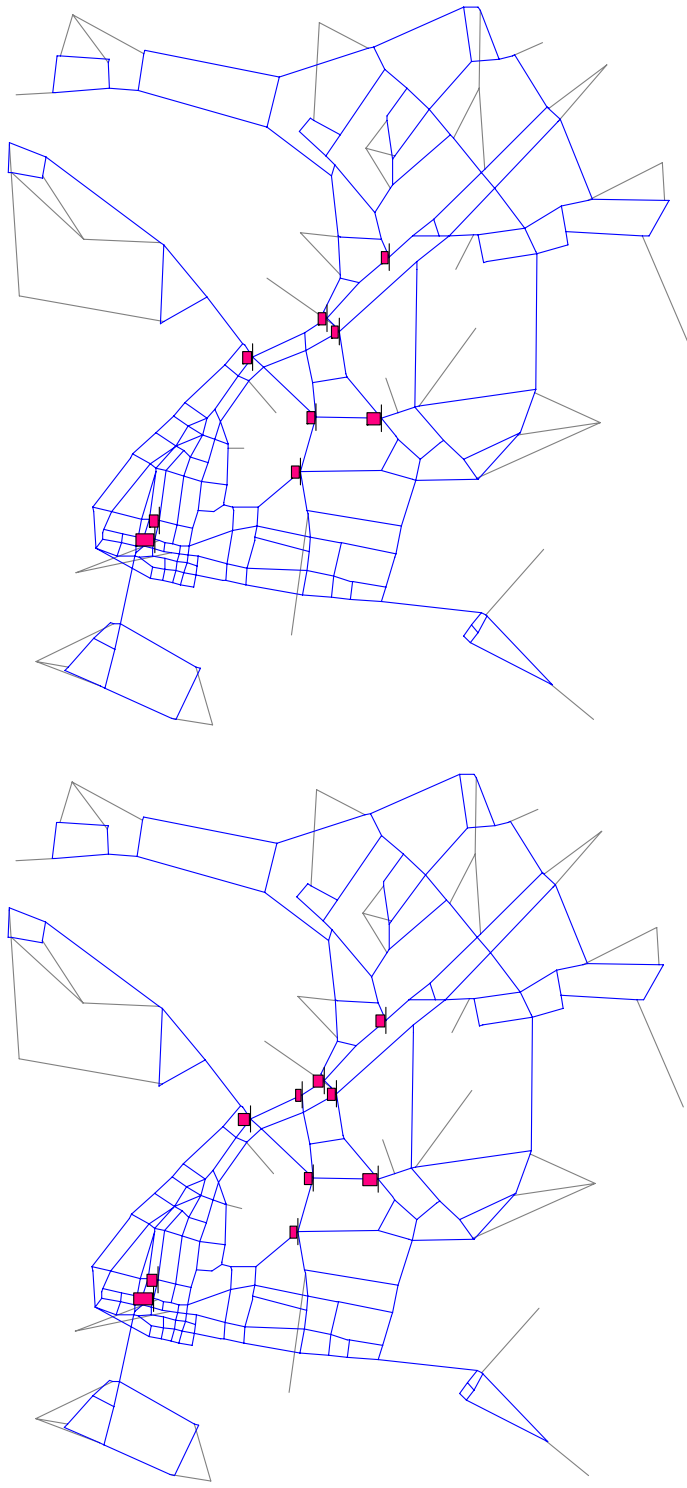
Figura 70. Cambios en la asignación de flujo a la red entre la situación base y distintos escenarios

Fuente: Elaboración propia

El hecho de que los aumentos y reducciones en tiempo de viajes no fueran similares, con la tarifa de \$50, se dio porque en las calles donde aumentó el flujo hay muy baja congestión, y prácticamente todas sus intersecciones están reguladas con señal de prioridad. Por el contrario, las calles donde hubo reducción de flujo son algunas de las más congestionadas del área centro.

En la figura anterior se puede ver cómo esta medida, que sólo se aplicó en la zona centro, tuvo un impacto muy importante en la asignación dentro de la parte de la red más cercana al centro, pero a partir de la tarifa de \$150 comenzó a afectar prácticamente toda la red, y con mayor intensidad a medida que aumentó la tarifa.

Dado que, la medida logró disminuciones de flujo en buena parte de la red, el grado de saturación de las intersecciones disminuyó con la tarifa. A continuación, podemos ver el cambio para distintas tarifas, se distingue como fueron disminuyendo las intersecciones con grados de saturación superiores al 30% y como disminuyó el grado de saturación en las restantes.

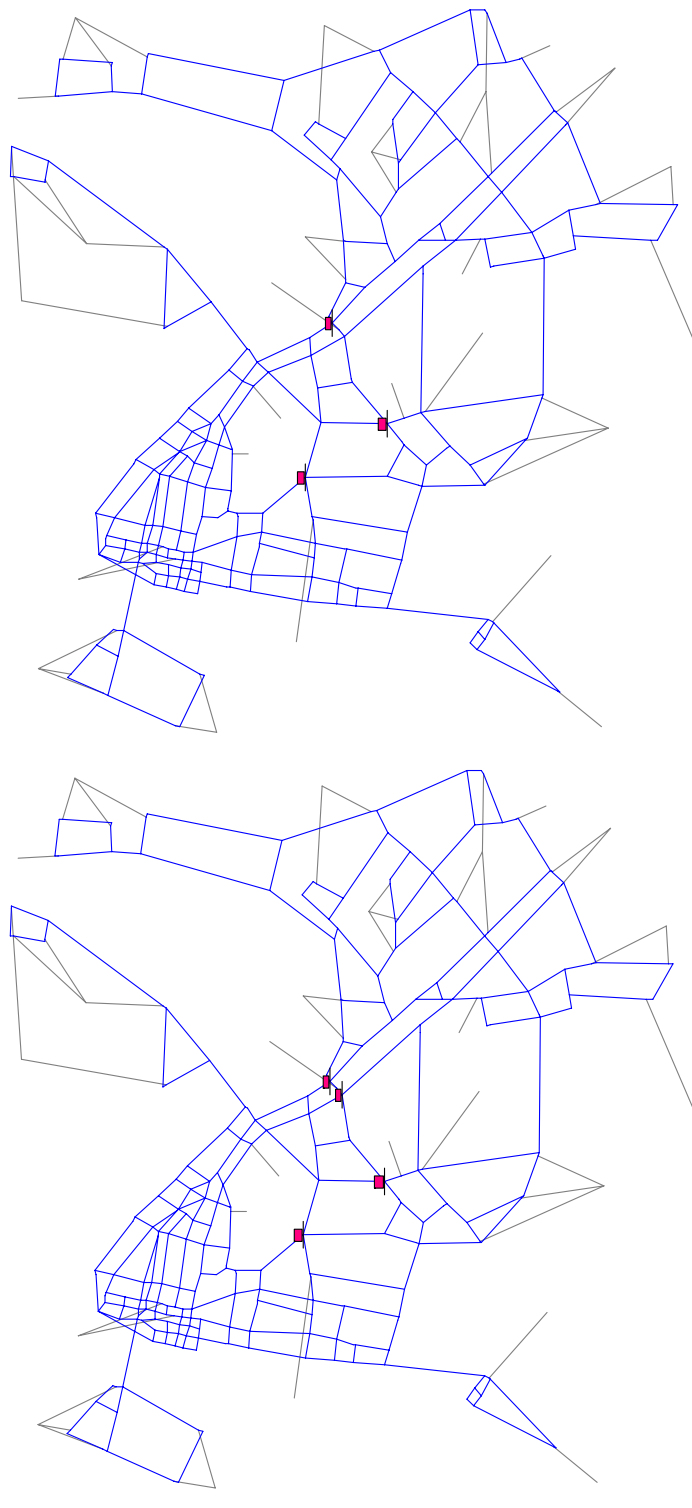


Situación base

Tarifa de \$50

Figura 71. Grados de saturación superiores a 30% en distintos escenarios

Fuente: Elaboración propia



Tarifa de \$500

Tarifa \$200

Figura 72. Grados de saturación superiores a 30% en distintos escenarios

Fuente: Elaboración propia

d. Tiempo de viaje e índice de rendimiento

Con la aplicación de la medida todas las líneas de transporte público disminuyeron su tiempo de viaje, y esta disminución aumentó con el incremento de la tarifa, aunque fue más pronunciada hasta la tarifa de \$200. Las líneas que más disminuyeron su tiempo de viaje fueron

las que conectan la zona sur-oriente con el centro. A continuación, se presenta globalmente las variaciones en el tiempo de viaje en las líneas de transporte público.

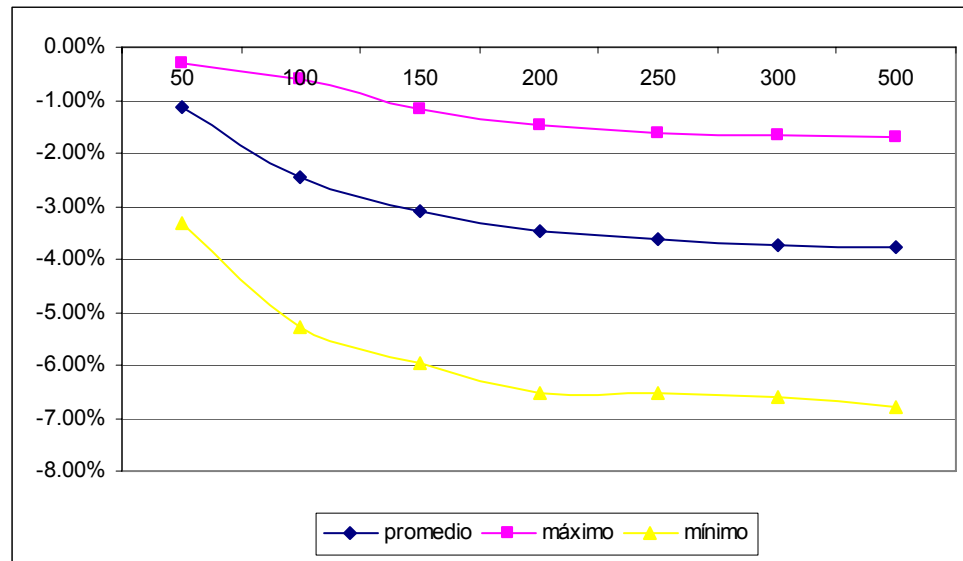


Figura 73. Variaciones en el tiempo de viaje de las líneas de transporte público

Fuente: Elaboración propia

Con la disminución en los flujos se mejoró la velocidad promedio tanto de los vehículos privados, como de los vehículos de transporte público. Sin embargo, esta disminución no fue siempre creciente con la tarifa para el caso del transporte privado, dado que con los cambios de ruta y disminución de flujo con tarifas superiores a \$150 se comenzó un descenso en la mejora de la velocidad.

El aumento en la velocidad siempre fue menor en el caso del transporte público, respecto al privado, y esto puede explicarse porque aumentó la cantidad de pasajeros en las líneas de transporte público, lo cual hizo aumentar las detenciones y demoras en los paraderos, compensando en parte la disminución de demoras en intersecciones y el aumento en la velocidad de recorrido.

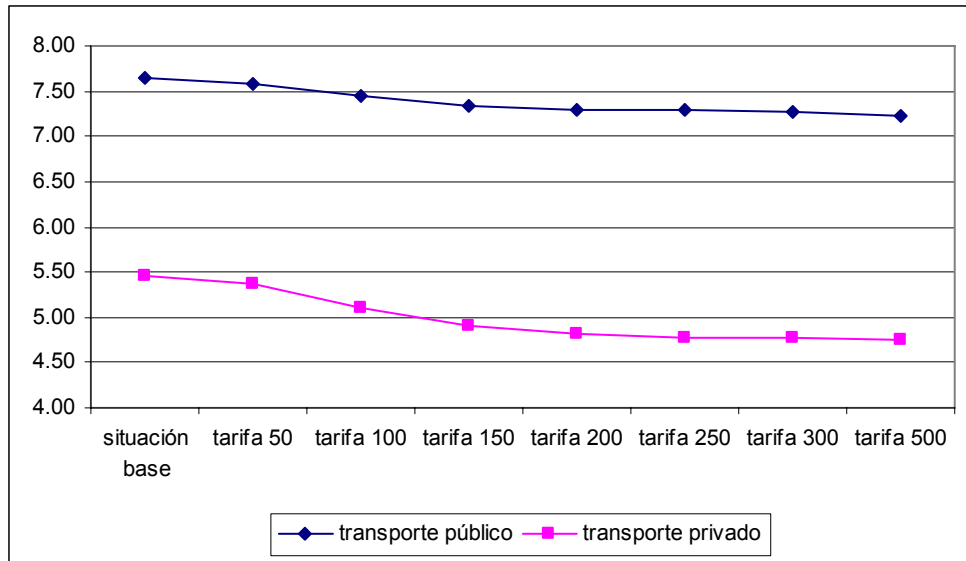


Figura 74. Tiempo de viaje promedio en transporte público y privado, en minutos

Fuente: Elaboración propia

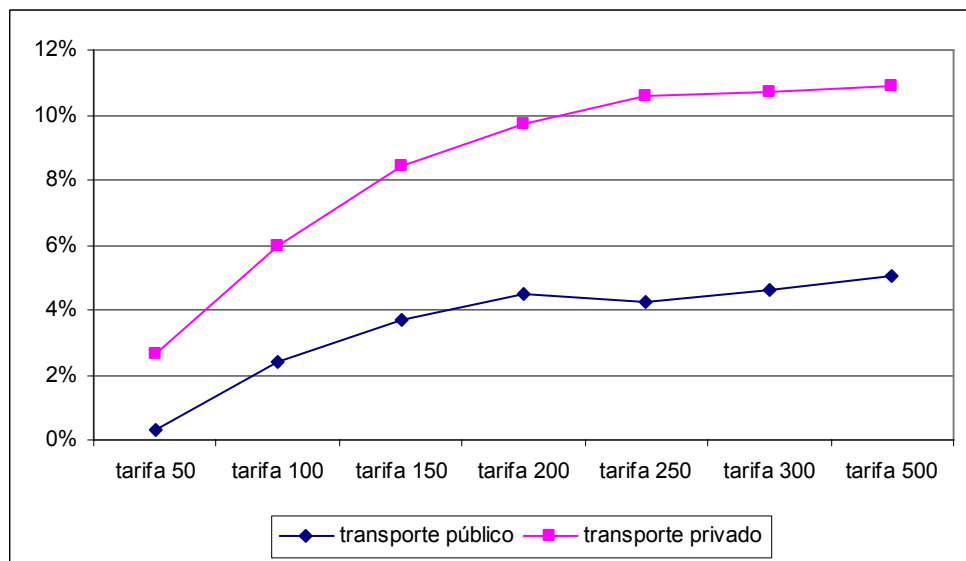


Figura 75. Diferencias en la velocidad promedio en transporte público y privado

Fuente: Elaboración propia

En concordancia con el aumento en la velocidad, al revisar los índices de rendimiento por modos agrupados, podemos observar que el índice para el transporte público y privado disminuyó con la tarifa, aunque esta disminución fue mayor en el transporte privado, lo cual es consecuente con las variaciones en las velocidades de los dos modos.

El caso de la caminata es distinto, ya que este índice está directamente relacionado con la distancia promedio del viaje. Con la tarifa de \$50 de la tarificación se produjo un cambio de viajes cortos a este modo, pero se van sumando los de mayor longitud a medida que aumenta la tarifa.

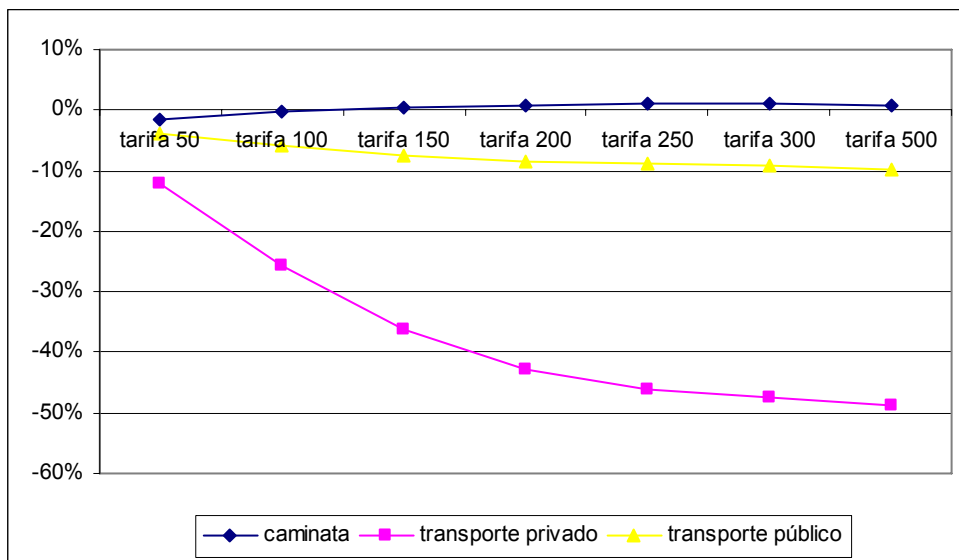


Figura 76. Diferencias del índice de rendimiento por modo y pasajero

Fuente: Elaboración propia

Al construir el índice total las variaciones en el transporte privado fueron las que marcaron la tendencia, aunque el porcentaje de cambio estuvo más cercano al del transporte público, por su alta participación y además, por su alto valor en relación con los otros.

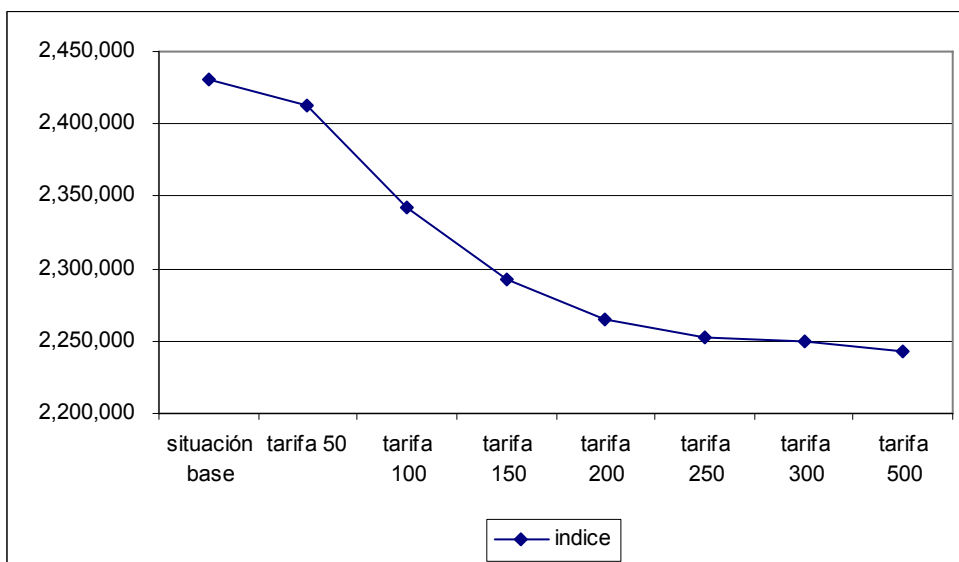


Figura 77. Diferencias del índice de rendimiento total

Fuente: Elaboración propia

e. Comparación con lo reportado en la literatura

Para el caso de la tarificación en una zona se tenía información real de lo ocurrido en Londres. Es importante destacar que existen diferencias importantes entre Londres y la ciudad de tamaño medio modelada, diferencias tanto de población, densidad, congestión, infraestructura de transporte público, entre otras. Por tanto, no se espera replicar los resultados observados en Londres ni siquiera hacer una comparación directa, pero esos resultados sí pueden servir de guía para hacer una comparación relativa.

Al comparar lo ocurrido respecto a la distribución de los viajes, en Londres entre el 5% y 6% de los encuestados (Mori, 2004) dijo haber cambiado el destino de su viaje. En el experimento este cambio fue de alrededor del 2%, pero al no poder modelar cambios en la generación, no disminuyeron los viajes atraídos por la zona tarifada, por tanto, sería previsible que los cambios en la distribución fueran mayores. Sin embargo, aun sin los cambios en la generación se lograron ver cambios en la distribución.

La partición modal según lo reportado en Londres tiene una variación de entre 11% y 16% para los viajes originados en la zona centro y en el resto de la ciudad, respectivamente. En el experimento ésta varió entre 7% y un 24% para los viajes con destino al centro y la tarifa más baja y más alta respectivamente, y entre un 5% y un 10% para los viajes de toda la ciudad.

Estos resultados, como ya se dijo, pueden ser un poco más altos por el bajo costo del promedio del modo auto chofer. Se entiende que la medida en Londres logra un impacto considerable, más del 10%, ya que la situación anterior a la tarificación más del 50% de los usuarios del sistema lo hacen en modos motorizados privados, por lo cual la medida afecta a un porcentaje muy alto de viajes.

7 CONCLUSIÓN

En este capítulo se exponen las conclusiones de esta investigación. Al inicio se presenta una síntesis con los principales resultados obtenidos; luego se hace una comparación con los objetivos planteados al comienzo de esta tesis, para ver en qué grado se alcanzaron, y finalmente se mencionan las posibles líneas de investigación que pueden derivar de este trabajo.

7.1 SÍNTESIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos para cada experimento.

Prioridad al transporte público

Con la prioridad al transporte público para el caso de las vías exclusivas, se prevé un cambio en la partición modal, dado que este modo se ve beneficiado, en desmedro del transporte privado. Con esta medida, los costos de este modo bajan frente a los demás, pero como una gran parte de los viajes no tiene el transporte privado disponible, la diferencia es más significativa entre el transporte público y la caminata. Con las variaciones de demanda no se ven diferencias en los cambios que se producen en la partición modal, al menos en los rangos de variación de demanda usada.

Es interesante ver que el área de influencia de la medida, es decir, la parte de la red donde los flujos aumentan o disminuyen en forma notoria, no se limita simplemente, a las calles paralelas más cercanas, sino que afecta a una gran porción de la red. Esto muestra que la medida no tiene un carácter local, y que sus efectos deben considerarse en un área amplia.

Con la medida de prioridad al transporte público se esperaba que disminuyeran los tiempos de recorrido de las líneas, aunque en algunos casos de líneas de taxis colectivos no ocurre esto, porque no usan ninguna de las vías exclusivas. El tiempo de viaje promedio sí disminuye para los pasajeros del transporte público, pero prácticamente no hay variación en tal disminución con los cambios de demanda. En el caso del transporte privado la situación es distinta, ya que el tiempo de viaje aumenta, y además la tendencia es que a mayor demanda, mayor incremento.

El índice de rendimiento por pasajero para la caminata y el transporte público, disminuyen con la medida, pero esto no se modifica con las variaciones de demanda. Por otro lado, este índice para el transporte privado aumenta, pero su tendencia es creciente con la demanda. Esto lleva a que el índice de rendimiento total disminuya, pero que la tendencia de su variación sea decreciente con la demanda.

Reversibilidad de vías

En general los efectos de la modelación de la vía reversible son moderados. No se ven grandes cambios en la partición modal o en los tiempos de viaje, y las variaciones en el índice de rendimiento no superan el 1,6% en ningún caso, siendo en general menores al 1%. Todo esto se confirma cuando se revisa el área de influencia que se enmarca, básicamente, por las vías paralelas al corredor reversible.

La reversibilidad de vías es una medida que puede ser polémica, ya que no siempre están claros sus beneficios.

En este caso la medida fue aplicada en una vía por la que transita casi todo, el transporte público de la ciudad y además, conecta funcionalmente, de manera directa las dos zonas con mayor concentración de viajes. Estas condiciones hacen que la medida tal como se evaluó, sea beneficiosa en la mayoría de los casos, ya que mejora el tiempo de viaje promedio de los usuarios de transporte público, aunque debido a reruteos aumenta el tiempo del transporte privado.

Tarificación vial en una zona

En general los resultados de la modelación de tarificación en una zona están en la línea de lo esperado.

Si bien existen variaciones en la distribución, apenas el 2% de los viajes, este porcentaje puede estar subestimado por la imposibilidad de variar los vectores de atracción y generación a partir de aumento de costos en los viajes.

Con esta medida se ve una modificación dramática en la partición modal cuando se revisa sólo lo que ocurre con los viajes con destino a la zona centro. Cuando se revisan los viajes de toda la ciudad las modificaciones varían entre 10% y 20%, aun con la menor tarifa.

Estos resultados son más pronunciados de lo esperado debido a que las tarifas usadas al compararlas con el costo de viaje promedio del modo auto chofer, están altas. Esto, acompañado a una elasticidad precio de la demanda para el modo auto chofer de 0,34 –mayor al que se da en el contexto chileno–, explica las variaciones en la partición modal.

Por lo tanto, en ciudades de tamaño medio sin grandes problemas de congestión, medidas como la de tarificación vial pueden reportar modificaciones importantes en el sistema de transporte, aun con tarifas bajas.

Al revisar lo que ocurre con la asignación para esta medida, se esperaba que los flujos del área centro disminuyeran y aumentaran en el anillo libre de pago. Sin embargo, cuando se aplica la tarifa de \$50 –la más baja del experimento– se nota un ligero aumento en los flujos de algunos arcos al interior del centro; producido por disminuciones de tiempos de viaje en otros arcos donde bajó el flujo, y estos últimos hacen parte de las nuevas rutas.

7.2 RESPUESTA A LOS OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis fue el de medir cuantitativamente los impactos de determinadas medidas de gestión de tránsito sobre la demanda de tráfico, utilizando como herramienta un modelo apropiado de carácter táctico (TRIPS).

Se revisaron diversas medidas de gestión de tránsito que potencialmente afectan la demanda de tráfico y sus impactos reportados en la literatura internacional. Primero se hizo una revisión de aquellas que afectan la demanda de tráfico, y luego revisando en más detalle, lo reportado en relación con los resultados. Por último, se eligieron las siguientes: la prioridad al transporte público, la reversibilidad de vías y la tarificación vial en una zona.

Se usó el modelo TRIPS para la estimación de dichos impactos y fue montado en un área de tamaño apropiado, basándose en la información de la ciudad Valdivia, donde se probaron las medidas de gestión elegidas y se revisaron sus impactos.

El definir distintos esquemas de gestión de tránsito en el área de análisis, comparar y discutir los resultados con los efectos observados o esperados—según la teoría y literatura—, fue bien desarrollado. Se hizo un buen análisis de resultados que permitió comprobar las bondades de las medidas en distintos aspectos. Para el desarrollo de este objetivo se tuvo un inconveniente ya que existen muy pocos reportes en la literatura sobre los resultados de algunas de estas medidas, por tanto, no se podía comparar (en todos los casos) si los resultados a los que se llegó, reflejan la realidad.

En el caso de medidas como la prioridad al transporte público y las vías reversibles, se encontró poca información sobre los efectos sobre la demanda de tráfico, pero se comprobó que la prioridad al transporte público sí tiene un efecto sobre ésta. En el caso de la tarificación vial los resultados obtenidos están en la misma línea de lo reportado por la literatura.

La prioridad al transporte público y la tarificación vial en una zona tienen un efecto significativo sobre la demanda de tráfico, pero la reversibilidad de vías no. Respecto a en qué proporción lo hacen en un medio como el chileno o latinoamericano, se observó que con las vías exclusivas hubo cambio mayor del modo caminata al transporte público, que del privado, por la poca disponibilidad de auto en la población. Para la tarificación vial el cambio en la partición modal fue muy fuerte, debido a los bajos costos de operación y valor del tiempo.

Una herramienta como TRIPS es bastante apropiada para captar este tipo de impactos, ya que es flexible y permite un buen detalle de la red, además puede usar, los resultados de costos generalizados en las etapas de demanda. Para temas específicos de transporte público podría mejorarse la forma en cómo se trata, en especial, el tema de detenciones en paraderos.

7.3 INVESTIGACIONES FUTURAS

A partir de esta tesis se pueden realizar investigaciones futuras y extender de esta forma, estos resultados. En este sentido, se proponen algunas prácticas como usar el mismo modelo sobre la misma herramienta y realizar modificaciones a los experimentos aquí presentados; esto puede hacerse implementando las medidas de vía exclusiva al transporte público, aplicando vías reversibles en otras vías, o también realizando modificaciones en los vectores de origen y destino en el caso de la tarificación en un área.

Otro ejercicio podría usar el mismo modelo sobre la misma herramienta y probar otras medidas, incluso algunas que no sean tan propias de la gestión como las autopistas urbanas.

Por último, se podría buscar nueva información y modelos de demanda calibrados, que incluyan los costos de viaje en la generación, para luego con esa información volver a probar los experimentos y de cierta forma confrontar los resultados de esta investigación.

8 BIBLIOGRAFÍA

Allsop, Richard E. (1983) Network models in traffic management and control. Transport Reviews, Vol 3, No 2.

Burgos, Vanessa (2004) Revisión de la incorporación del transporte público en modelos microscópicos de tráfico. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile

Bus priority (www.buspriority.org)

Cairns S., S Atkins y P. Goodwin (2002) Disappearing traffic? The story so far. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Municipal engineer. Vol 151, N° 1

Cairns, S, P Goodwin, C Hass-Klau (1998) Evidence on the effects of road capacity reduction on traffic levels. Traffic Engineering & Control, Vol 39, N° 6.

Carrasco, J. A., J. de D. Ortúzar, M. Munizaga (2001) Una revisión y análisis de la especificación del modelo *logit* jerárquico. Actas del X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, 45-60, Concepción.

Chaparro, Irma (2002) Evaluación del impacto socio económico del transporte urbano en la ciudad de Bogotá. El caso del sistema de transporte masivo, Transmilenio. División de recursos naturales e infraestructura, Unidad de transporte, CEPAL

CIS (1998a) Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de Osorno. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Santiago.

CIS (1998b) Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de Valdivia. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Santiago.

CITILABS (2001) TRIPS (TRansport Improvement Planing System) Demo. www.citilabs.com. CITILABS Ltd, Surrey, UK.

CITRA LTDA (1998) Estudio de Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Temuco, II° Etapa. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Santiago.

Ferguson, E. T. (1991) Overview of Evaluation Methods with Applications to Transport Demand Management. Transportation Research Record 1321.

Fernández, R. (1999). Gestión de tránsito urbano. Publicación DT-DOC/01/99. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Fernández, R. and Valenzuela E. (2003 a) A model to predict bus commercial speed. Traffic Engineering and Control. Vol 44(2) 67-71

Fernández, R. y Valenzuela E. (2003 b) Modelo para estimar la velocidad comercial del transporte público en Santiago de Chile. Actas XI Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, 247-256, Santiago.

IHT (1997). *Transport in the Urban Environment*. The Institution of Highway & Transportation, London.

INRO Consultant Inc. (1998) EMME/2 User's Manual.

Macro Ingenieros (1996) Evaluación ex - post vía exclusiva avenida Grecia. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Santiago.

MIDEPLAN (2001) Manual de operación del modelo ESTR AUS, Versión 2.04. Ministerio de Planificación y Cooperación, Santiago, Chile.

Montero, L., E. Codina, J. Barceló y P. Barceló (1998) Combining macroscopic and microscopic approaches for transportation planning and design of road networks". 19th Conference of the Australian Road Research Board. Proceedings of the 19th ARRB Transport Research Conference. Sidney

Mori (2004) Central London congestion charge social impacts surveys 2002, 2003. Research study conducted for Transport London

Ortúzar, J. de D. (1998) Modelos de demanda de transporte. Ediciones Universidad Católica de Chile.

Ortúzar, J. de D. (2000) Modelos econométricos de elección discreta. Ediciones Universidad Católica de Chile.

Sheffi, Y. (1985) Urban Transportation Networks. Prentice Hall.

Siegel, Justin y Louis de Grange (2001) Utilización conjunta de modelos macro y microscópicos para el análisis de sistemas de transporte urbano. Actas X Congreso Chileno de Ingeniería de Transporte, Concepción.

SUROESTE Consultores (2000) Diagnóstico del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Puerto Montt, I Etapa. Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte, Santiago.

Van Vliet, D. (1993) SATURN Version 8.4. A User's Manual – Universal Version. The Institute for Transport Studies, The University of Leeds.

Victoria Transport Policy Institute (www.vtpi.org)

Vincent, R., A. Mitchell and D.I. Robertson. (1980) User Guide to TRANSYT Version 8. Transport and Road Research Laboratory, Report LR 888, Crowthorne.

Wallace, B, Fred Mannering y G. Scott Rutherford (1999) Evaluating Effects of Transportation Demand Management Strategies on Trip Generation by Using Poisson and Negative Binomial Regression. Transportation Research Record 1682.

TSS – Transport Simulation Systems (2000) GETRAM/AIMSUM2 User's Manual.