



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

## DISEÑO ÓPTIMO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO CONSIDERANDO SU EFECTO EN LA ESTRUCTURA URBANA

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

NICOLÁS DIONISIO ESPERGUIEL HERNÁNDEZ

PROFESOR GUÍA:  
LEONARDO BASSO SOTZ

PROFESOR CO-GUÍA  
HUGO SILVA MONTALVA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
SERGIO JARA DÍAZ  
RICARDO HURTUBIA GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE  
2020

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA, MENCIÓN TRANSPORTE  
POR: NICOLÁS ESPERGUIEL H.  
FECHA: 2020  
PROF. GUÍA: SR. LEONARDO BASSO S.  
PROF. CO-GUÍA: SR. HUGO SILVA M.

## DISEÑO ÓPTIMO DE UN SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO CONSIDERANDO SU EFECTO EN LA ESTRUCTURA URBANA

La planificación de transporte público, por lo general, ignora el efecto de largo plazo en la dinámica urbana y se centra, principalmente, en el recurso tiempo de los usuarios, sin embargo, desentenderse por completo de lo primero decanta en una planificación deficiente con consecuencias indeseadas o inesperadas en el largo plazo sobre la estructura urbana. El objetivo de la presente investigación es entregar conclusiones relevantes a planificadores o entes reguladores pertinentes acerca del efecto que el diseño del sistema de transporte público tiene sobre la estructura urbana y del diseño que mejora el bienestar de la sociedad, entendiendo quiénes son los agentes beneficiados y perjudicados.

Para llevar a cabo el objetivo planteado se modela una ciudad monocéntrica lineal que posee un sistema de transporte público masivo con detenciones que se extienden a lo largo de ésta. En la ciudad existen diversos actores que interactúan para llegar a un equilibrio urbano: residentes que deciden su localización, desarrolladores inmobiliarios que construyen viviendas, terratenientes que rentan sus terrenos para la construcción de éstas, un ente encargado de la operación del transporte público y un planificador que se encarga de diseñar el sistema de transporte público. La estrategia utilizada para cumplir con el objetivo planteado consiste en maximizar el bienestar social en base a las variables de diseño del sistema de transporte público considerando el cambio en el equilibrio de la ciudad, es decir, considerando su efecto en la estructura urbana.

Dentro de los principales hallazgos se encuentra que una extensión del corredor de transporte público, un aumento significativo de la frecuencia y una disminución en la tarifa, aumentan el límite urbano, elevan el valor de los terrenos y viviendas de las zonas suburbanas, en conjunto con su densidad, y pueden contribuir a la formación de suburbios desconectados, por otra parte, las estructuras de líneas también tienen un efecto significativo sobre la estructura urbana, la introducción de un transbordo en el sistema eleva el valor relativo de las zonas más cercanas al CBD, mientras que servir los suburbios a través de una línea independiente genera el efecto contrario. En cuanto a la estructura de diseño óptima, se encuentra que las líneas exclusivas son la mejor forma de servir la ciudad, lo cual viene dado principalmente por la disminución del costo generalizado de viaje en gran parte de la ciudad y un aumento en el tamaño de las viviendas. Además, se muestra que, a diferencia de lo encontrado en la literatura previa, al considerar el efecto en la estructura urbana, un espaciamiento entre estaciones que se comporta de manera no monótona con la distancia al CBD puede lograr un mayor beneficio para la sociedad que estaciones equidistantes.

# Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Estructura de la tesis .....	3
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Economía urbana: modelos monocéntricos y su relación con transporte .....	5
2.2	Análisis Microeconómico y Diseño Óptimo de Transporte Público .....	12
2.2.1	Líneas de Transporte Aisladas.....	12
2.2.2	Líneas de Transporte Paralelas .....	14
2.2.3	Estructura de líneas.....	15
2.2.4	Espaciamiento entre estaciones .....	17
3	MODELO .....	19
3.1	Consumidores .....	20
3.2	Oferta inmobiliaria.....	22
3.3	Condiciones de equilibrio urbano .....	23
3.4	Transporte Público .....	24
3.4.1	Línea Única.....	25
3.4.2	Líneas con transbordo.....	26
3.4.3	Líneas Exclusivas .....	28
3.4.4	Espaciamiento variable.....	29
3.5	Costo generalizado de viaje de los residentes.....	30
3.6	Bienestar y óptimo social.....	33
4	ESTRUCTURA URBANA Y TRANSPORTE PÚBLICO .....	37
4.1	Frecuencia .....	40
4.2	Tarifa.....	43
4.3	Estructura y longitud del corredor de transporte público .....	46
4.4	Línea con transbordo .....	50
4.5	Líneas exclusivas .....	52
4.6	Suburbios desconectados .....	55
5	DISEÑO ÓPTIMO DE TRANSPORTE PÚBLICO .....	58
5.1	Línea Única.....	59

5.1.1	Descripción General del Óptimo Social .....	59
5.1.2	Análisis de estructura espacial del corredor .....	61
5.2	Línea con Transbordo .....	63
5.2.1	Descripción General del Óptimo Social .....	63
5.2.2	Comparación con Estructura de Línea Única .....	65
5.3	Líneas Exclusivas .....	68
5.3.1	Descripción general del Óptimo Social .....	68
5.3.2	Comparación con Estructura de Línea Única .....	69
5.4	Sistema de Transporte Público Óptimo .....	72
6	Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación.....	73
6.1	Síntesis y Conclusiones .....	73
6.2	Líneas Futuras de Investigación .....	74
	Bibliografía.....	76
	Apéndice A. Desarrollo Analítico .....	80
	Apéndice A.1: Estructura Urbana.....	80
	Apéndice B. Valor de los parámetros de simulación .....	83
	Apéndice B.1: Parámetros generales .....	83
	Apéndice B.2: Costo privado de transporte público.....	83

# Índice de Tablas

Tabla 4.1: Parámetros utilizados en las simulaciones numéricas. ....	39
Tabla 5.1: Variables de diseño en el óptimo social con una estructura de línea única de transporte público. ....	59
Tabla 5.2: Desagregación del costo privado de transporte público (En Miles de US\$). ....	60
Tabla 5.3: Desagregación del beneficio social en el óptimo (en Miles de US\$). ....	61
Tabla 5.4: Parámetros que modelan la estructura interna del corredor en el óptimo social. ....	62
Tabla 5.5: Desagregación del beneficio social en el óptimo con una estructura de corredor no equidistante (en Miles de US\$). ....	63
Tabla 5.6: Variables de diseño en el óptimo social con una estructura de línea con transbordo. ..	63
Tabla 5.7: Desagregación del costo privado de transporte público (En Miles de US\$). ....	64
Tabla 5.8: Desagregación del beneficio social con líneas con transbordo sin considerar penalidad de transbordo en el óptimo (en Miles de US\$). ....	64
Tabla 5.9: Variables de diseño en el óptimo social con una estructura de línea con transbordo. ..	64
Tabla 5.10: Desagregación del costo privado de transporte público (En Miles de US\$). ....	65
Tabla 5.11: Desagregación del beneficio social con líneas con transbordo considerando una penalidad por transbordar (en Miles de US\$). ....	65
Tabla 5.12: Variación en las componentes del beneficio social óptimo al comparar el sistema de líneas con transbordo con el de línea única (en Miles de US\$). ....	68
Tabla 5.13: Variables de diseño en el óptimo social con una estructura de líneas exclusivas. ....	68
Tabla 5.14: Desagregación del costo privado de transporte público (En Miles de US\$). ....	69
Tabla 5.15: Desagregación del beneficio social en el óptimo (en Miles de US\$). ....	69
Tabla 5.16: Variación en las componentes del beneficio social óptimo al comparar el sistema de líneas exclusivas con el de línea única (en Miles de US\$). ....	71

# Índice de Figuras

Figura 2.1: Precio de renta de los terrenos ( $r$ ) según distancia al CBD ( $x$ ).....	6
Figura 2.2: Precio de renta y tamaño de las viviendas según distancia al CBD para un modelo basado sólo en tren y el modelo “R+P”. Fuente: Li et al (2012).....	10
Figura 2.3: Costos de viajar a diario al CBD según distancia a éste ( $x$ ). Fuente: Basso et al (2018). .....	10
Figura 2.4: Precio de renta ( $p$ ) y tamaño ( $q$ ) de las viviendas según distancia al CBD. Fuente: Basso et al (2018). .....	11
Figura 2.5: Precio de renta de terrenos ( $r$ ) y densidad estructural ( $S$ ) según distancia al CBD. ...	11
Figura 2.6: Estructura de línea directas y de corredor. Fuente: Jara-Díaz y Gschwender (2003b). .....	15
Figura 2.7: Estructura de líneas. Fuente: Jara-Díaz et al (2012). .....	16
Figura 2.8: Estructura de línea directas. Fuente: Gschwender et al (2016).....	16
Figura 2.9: Estructura de líneas en el contexto de una ciudad paramétrica. Fuente: Fielbaum et al (2016). .....	17
Figura 3.1: Estructura de línea única. ....	25
Figura 3.2: Estructura de líneas con transbordo. ....	27
Figura 3.3: Estructura de líneas exclusivas. ....	28
Figura 4.1: Precio de renta de terrenos para diferentes valores de frecuencia según distancia al CBD.....	41
Figura 4.2: Variación porcentual en el precio de renta y tamaño de las viviendas ante un cambio en la frecuencia de 12 veh/h a 30 veh/h según distancia al CBD.....	42
Figura 4.3: Variación del número de habitantes por kilómetro al modificar la frecuencia del sistema de transporte público de 12 veh/h a 30 veh/h. ....	43
Figura 4.4: Partición modal del Transporte Público para diferentes niveles tarifarios. ....	44
Figura 4.5: Precio de renta de los terrenos para diferentes tarifas según distancia al CBD. ....	44
Figura 4.6: Diferencial del precio de renta y tamaño de las viviendas ante un aumento en la tarifa de US\$2 a US\$4 según distancia al CBD.....	45
Figura 4.7: Variación en la cantidad de habitantes por kilómetro ante un aumento en la tarifa de US\$2 a US\$4. ....	46
Figura 4.8: Renta de los terrenos urbanos con un corredor de 12 km de longitud para un espaciamiento entre estaciones de 0.5 km y 1 km. ....	47
Figura 4.9: Variación porcentual de la renta urbana y el tamaño de viviendas al pasar de un espaciamiento entre estaciones de 0.5 km a 1 km. ....	48
Figura 4.10: Variación porcentual en la cantidad de habitantes cada 200 metros al pasar de un espaciamiento entre estaciones de 0.5 km a 1 km. ....	49
Figura 4.11: Renta de terrenos según distancia al CBD con 15 y 12 estaciones de transporte público. ....	50
Figura 4.12: Precio de renta de los terrenos ante la introducción de un sistema con transbordo. .	51
Figura 4.13: Variación en el precio de renta y tamaño de las viviendas al introducir un sistema de línea con transbordo.....	51
Figura 4.14: Cantidad de habitantes por kilómetro con y sin líneas con transbordo.....	52

Figura 4.15: Precio de renta de terrenos al introducir un sistema de transporte público con líneas exclusivas. ....	53
Figura 4.16: Variación en el precio de renta y tamaño de las viviendas al introducir un sistema con líneas exclusivas. ....	54
Figura 4.17: Cantidad de habitantes por kilómetro con y sin líneas exclusivas. ....	55
Figura 4.18: Renta de terrenos de los últimos kilómetros de la ciudad según distancia al CBD con 15 y 12 estaciones de transporte público. ....	57
Figura 5.1: Porcentaje de residentes usuarios de cada una de las estaciones de transporte público (estación 18 es la más lejana al CBD). ....	60
Figura 5.2: Renta de terrenos en el óptimo social con una estructura de línea única. ....	61
Figura 5.3: Estructura espacial interna del corredor hasta la catorceava estación ( $\varepsilon(n)$ ): espaciamiento entre la estación $n$ y $n - 1$ en km). ....	62
Figura 5.4: Estructura espacial interna hacia el final del corredor ( $\varepsilon(n)$ ): espaciamiento entre la estación $n$ y $n - 1$ en km). ....	62
Figura 5.5: Variación en el costo de viaje al comparar el sistema óptimo con una línea de transporte con transbordo con el de línea única. ....	66
Figura 5.6: Variación en la renta de viviendas y terrenos y en el tamaño de viviendas al comparar el óptimo con una línea de transporte con transbordo y con una línea única. ....	67
Figura 5.7: Variación porcentual en la afluencia por estación de transporte público al comparar el diseño óptimo con estructura de líneas con transbordo con el de línea única. ....	67
Figura 5.8: Variación del costo generalizado de viaje al comparar el óptimo con líneas exclusivas de transporte con el óptimo en base a una línea única. ....	70
Figura 5.9: Afluencia por estación de transporte público al comparar el óptimo con líneas exclusivas de transporte con el óptimo con línea única. ....	70
Figura 5.10: Variación en la renta de viviendas y terrenos y en el tamaño de viviendas al comparar el óptimo con líneas exclusivas de transporte con el óptimo con línea única. ....	71

# Capítulo I

## 1 INTRODUCCIÓN

### 1.1 Motivación

El efecto que el transporte tiene sobre la estructura urbana es innegable, de hecho, a lo largo de toda la historia moderna se puede ver su influencia en las grandes urbes del mundo. Daniels y Warnes (2013) establecen que, a comienzos del siglo XIX, en los países altamente industrializados, el espacio de la ciudad se caracterizaba por altas densidades con calles estrechas y construcciones tan altas como la tecnología de la época lo permitía debido a que las distancias que debían cubrir los individuos se realizaban principalmente a pie. Con el pasar del tiempo estas ciudades, que eran compactas, poco a poco comenzaron a extender sus límites urbanos ya que la mejora de la tecnología de transporte hizo posible viajar largas distancias en un menor tiempo, permitiendo el desarrollo de las grandes urbes que vemos hoy en día. A lo largo del siglo pasado y el actual diversos autores han mostrado el efecto que tiene la tecnología de transporte en la dinámica de la estructura urbana, por ejemplo: Capozza (1973) muestra el efecto suburbanizador del modo metro, Bowes y Ihlanfeldt (2001) identifican los impactos de las estaciones de tren en el valor de las propiedades residenciales, Baum-Snow (2007b) muestra como una nueva autopista puede llegar a reducir la población de las zonas céntricas de las ciudades y en el caso particular de Chile, trabajos como el de Agostini y Palmucci (2008) y Sagner (2009) muestran el efecto positivo que tiene una línea de metro en el precio de las viviendas cercanas a sus estaciones. Aparentemente la sentencia de Rae (1968) de que la metrópolis moderna es un producto de la tecnología de transporte no parece ser para nada desacertada.

Dada la existencia de una clara relación entre la estructura urbana y el transporte, cabe cuestionarse dicha relación, pero con el transporte público, uno de los modos esenciales para provisionar la gran cantidad de viajes que se realizan en las ciudades del mundo. En ese sentido, parece importante estudiar el efecto que el transporte público puede tener sobre la estructura urbana y más aún las consideraciones que debiesen tener en cuenta los planificadores urbanos o de transporte y/o la autoridad pertinente al momento de diseñar un sistema de transporte público, da tal forma de entender no sólo cómo es afectado el tiempo de viaje de los usuarios con un cierto diseño, sino que también comprender las dinámicas de estructura urbana que se pueden producir en el largo plazo. Desentenderse de esto último puede provocar ciertas consecuencias indeseadas o no previstas por las autoridades, como por ejemplo: aumento de densidad poblacional en zonas en las que no estaba planificado, un aumento desmesurado del precio de las viviendas en ciertas zonas de la ciudad, una sorpresiva extensión del límite urbano o la disminución excesiva del tamaño de las viviendas. Para evitar consecuencias no previstas o indeseadas para el planificador o autoridad es necesario estudiar en detalle el diseño del sistema de transporte público y su efecto en la estructura urbana, entender



quiénes se ven perjudicados o beneficiados y si eso es lo que realmente se busca realizar ex ante a la implementación o modificación de un sistema de transporte.

En la literatura la interrelación entre el tiempo de viaje, el cual depende de la tecnología de transporte, y la estructura urbana, ha sido capturada en una disciplina conocida como economía urbana, la cual se encarga de dar una explicación económica a una serie de regularidades de la estructura espacial de las ciudades. En dicha línea de investigación ha surgido un modelo de estructura espacial urbana, conocido como modelo monocéntrico, el cual logra explicar muchas de las regularidades observadas en la realidad en diversas ciudades del mundo. Dicho modelo se deriva de los trabajos seminales de Alonso (1964), Mills (1967) y Muth (1969), los cuales giran en torno a la idea clave de que existe un “trade-off” o compromiso entre el precio de las viviendas y el tiempo de viaje asociado para llegar a un CBD (siglas del inglés “Central Business District”). En el marco de este modelo se ha llevado a cabo una gran cantidad de investigación en diversos temas tales como, expansión urbana (por ej: Brueckner y Fansler, 1983; Brueckner y Kim, 2003), restricciones de altura de las construcciones (ver Bertaud y Brueckner, 2005), congestión (por ej: Solow, 1972) y tarificación vial (por ej: Arnott, 1979; Sullivan, 1983a; Kraus, 1989), entre otros. Si bien el modo transporte público ha sido incorporado en este marco teórico, una modelación detallada del diseño del sistema de transporte público que incluya la incorporación de paradas y/o estaciones en conjunto con variables de diseño tales como: frecuencia, tarifa, número de paradas o espaciamiento entre ellas, a nuestro conocimiento, sólo se ha llevado a cabo en recientes investigaciones (ver Li et al, 2012; Basso et al, 2018 y Mun y Taguchi, 2018), aunque en ninguna de ellas se considera las externalidades producidas por los propios pasajeros del sistema. A pesar de que éstas han logrado incorporar muchos aspectos que investigaciones pretéritas no capturaban, aún existen ciertos temas que no han sido abordados y que son importantes en la toma de decisiones de entes reguladores, tales como, la estructura espacial entre las paradas de un corredor o la estructura de líneas de transporte. Cabe mencionar que desde la literatura de análisis microeconómico de transporte público, la cual tiene como base el trabajo seminal de Mohring (1972), si se ha abordado un análisis detallado de los sistemas de transporte público, con el cual se han estudiado temas tales como: hacinamiento (ver Kraus, 1991), espaciamiento entre líneas paralelas (ver Chang y Schonfeld, 1991) y estructura de líneas (por ej: Fielbaum et al, 2016; Jara-Díaz et al 2012), entre otros. Sin embargo, a pesar de la vasta investigación que se ha llevado a cabo, desde este enfoque de estudio se ha ignorado el impacto que el transporte público puede ocasionar sobre la estructura urbana, de hecho, las investigaciones se realizan sobre estructuras espaciales predeterminadas que no consideran la posibilidad de relocalización de los usuarios.

La principal motivación de este trabajo viene dada por ayudar a planificadores urbanos o de transporte y/o autoridades pertinentes a entender cuáles son las dinámicas que se dan entre un sistema de transporte público y la estructura urbana y cómo debiese ser el diseño que mejora el bienestar de la sociedad, entendiendo quiénes son los actores beneficiados y perjudicados.

## **1.2 Objetivos**

El objetivo principal del presente trabajo de investigación es entender en detalle los efectos de largo plazo que el transporte público genera sobre la dinámica urbana, en el contexto de un modelo de ciudad monocéntrico, y encontrar el diseño del sistema de transporte público que maximiza el bienestar social al considerar dicha interacción. De esta manera, se espera poder obtener conclusiones relevantes para los planificadores urbanos o de transporte, u otra autoridad pertinente, de forma tal que los efectos de largo plazo que se dan sobre la estructura urbana no sean ignorados y se eviten consecuencias inesperadas o indeseadas.

En cuanto a los objetivos específicos de la investigación se encuentran: extender el modelo de Basso et al (2018) al incorporar externalidades y un diseño detallado del sistema a través de sus variables de diseño, ser capaz de incorporar diferentes tipos de estructuras de líneas en la modelación, capturar la estructura interna del corredor de transporte a través de un espaciamiento entre estaciones variable según distancia al CBD y ser capaz de resolver un problema sumamente no lineal y de alta complejidad mediante simulaciones numéricas.

## **1.3 Estructura de la tesis**

El trabajo de investigación se compone de seis capítulos, cada uno de los cuáles, salvo la presente introducción, se describen a continuación.

En el segundo capítulo se realiza una revisión de trabajos de investigación del área de economía urbana y de la literatura microeconómica de diseño de sistemas de transporte públicos. En el primer caso se repasan los principales aportes basados en modelos monocéntricos, principalmente teóricos y en algunos casos empíricos, que de algún modo analizan la interacción entre transporte y la estructura urbana, mientras que en el segundo caso el foco de lo revisado se encuentra principalmente en la estructura espacial del diseño.

En el tercer capítulo se detallan las bases del modelo en que se sustenta esta investigación, el cual es una integración entre lo realizado por economistas urbanos e investigadores dedicados al diseño óptimo de transporte público desde una perspectiva microeconómica.

El cuarto capítulo trata de manera detallada los efectos de largo plazo que el transporte público genera sobre la estructura urbana, mientras que en el quinto capítulo se obtiene el diseño del sistema que maximiza el bienestar social al considerar dicha relación estudiada en el capítulo 4. Cabe mencionar que la mayor parte de lo desarrollado en ambos capítulos se hace en base a simulaciones numéricas.

Finalmente, en el capítulo 5 se sintetiza lo desarrollado a lo largo de toda la investigación, se formalizan las principales conclusiones y se plantean futuras líneas de investigación.

# Capítulo II

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presenta una revisión bibliográfica de los principales temas abordados en esta tesis. Ésta se divide en dos partes, una en que se revisan los principales trabajos de investigación en economía urbana, basados en modelos monocéntricos, que tienen relación con transporte, y en particular, con el modo transporte público, y otra en la cual se hace un repaso por los principales aportes en la vasta literatura de análisis microeconómico de diseño de transporte público con un enfoque principalmente centrado en la componente espacial de éste.

### 2.1 Economía urbana: modelos monocéntricos y su relación con transporte

La economía urbana es la ciencia encargada de dar una explicación a una variedad de regularidades que se observan en la estructura espacial de las ciudades, por ejemplo, que las construcciones son más altas cerca de los centros, que la densidad poblacional es menor en las áreas suburbanas y que el tamaño de las viviendas tiende a ser más pequeño en las zonas céntricas de las ciudades. El principal modelo utilizado para analizar este tipo de regularidades ha sido el modelo monocéntrico, basado en los trabajos seminales de Alonso (1964), Muth (1969) y Mills (1967), los cuales también son el cimiento sobre el cual se construyen las bases de la presente investigación. Cabe mencionar que, con el paso de los años, también se han creado modelos que logran capturar el policentrismo de las ciudades, sin embargo, ese tipo de estructura de ciudad se encuentra fuera del alcance de este trabajo. En esta subsección de la revisión se presentan los principales aportes teóricos, basados en modelos monocéntricos, y algunos aportes empíricos, que de algún modo tienen relación con transporte y en particular con el diseño de transporte público.

Como ya se mencionó, la literatura de economía urbana tiene como base los modelos de Alonso (1964), Muth (1969) y Mills (1967), los cuales se basan en la idea clave de que las diferencias de costos de viaje al CBD son balanceadas por las diferencias en el precio de las viviendas, es decir, un individuo debe estar dispuesto a pagar más por una vivienda si elige vivir más cerca del CBD ya que enfrenta un menor costo de viaje, mientras que un individuo que vive lejos del centro paga menos por residir en una vivienda pero tiene un costo de viaje mucho mayor. Alonso (1964) incorpora esta idea en un modelo en donde los individuos adquieren o “consumen” terrenos directamente, mientras que Muth y Mills analizan un modelo más realista donde los terrenos actúan como insumo intermedio en la producción del bien final vivienda. Brueckner (1987) unifica las tres visiones en un único modelo y muestra como éste es capaz de capturar las regularidades

observadas en la estructura de las ciudades, además de realizar diversos análisis de estática comparativa del equilibrio urbano con los cuales se puede comparar las estructuras espaciales de diferentes ciudades. Si bien en Wheaton (1974) este tipo de análisis ya se había hecho para el modelo de Alonso (1964), el aporte de Brueckner (1987) fue generalizar en un único modelo las tres visiones de modelación.

En el modelo de Brueckner (1987) se tiene que cada residente urbano viaja diariamente a su trabajo localizado en el CBD a través de una densa red de caminos radiales con un costo asociado por viajar a diario que es monótonamente creciente con la distancia al centro de la ciudad. Esto se encuentra directamente relacionado con la estructura interna de la ciudad, de hecho, el autor tomando como base este costo de viaje realiza un análisis intra-ciudad a través del cual desprende la estructura urbana. El modelo considera tanto a los residentes urbanos (consumidores de viviendas) como a la oferta del mercado de viviendas a través de la figura de los desarrolladores inmobiliarios. Las variables que describen la estructura urbana según la distancia al CBD son el precio de renta de viviendas y terrenos, tamaño de las viviendas y densidades estructurales y poblacionales. Cabe mencionar que todas estas variables, en el equilibrio urbano, quedan en función del ingreso de los residentes, la distancia al CBD en el cual se encuentran sus viviendas, el costo de viajar al CBD a diario y el nivel de utilidad alcanzado en este. El autor a través de un desarrollo matemático muestra que tanto el precio de renta de las viviendas como de los terrenos y las densidades estructural y poblacional son funciones decrecientes de la distancia al CBD (ver Figura 2.1), siendo el tamaño de las viviendas la única variable de estructura urbana que tiene un comportamiento disímil.

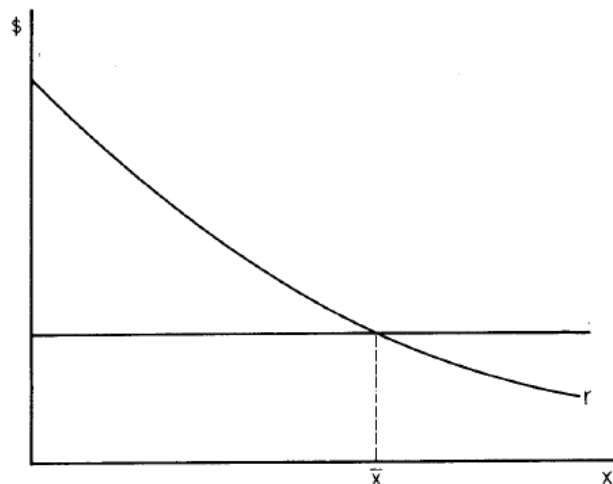


Figura 2.1: Precio de renta de los terrenos ( $r$ ) según distancia al CBD ( $x$ ).  
Fuente: Brueckner (1987).

A continuación, se revisan diferentes líneas de investigación que tienen directa relación con el área de transporte o sus externalidades y han sido fruto de largos años de investigación en base el modelo monocéntrico de economía urbana, desprendido de lo realizado por Alonso (1964), Muth (1969) y Mills (1967).

Uno de los primeros temas en ser abordado, por la economía urbana, que tiene una directa relación con transporte, es la congestión, siendo Solow (1972) uno de los primeros trabajos en tratar este tema en conjunto con los trabajos postreros de tarificación óptima, asociada a esta externalidad, llevados a cabo en Arnott (1979) y Sullivan (1983a). El resultado general de estas investigaciones es que, la tarificación por congestión de primer mejor, es decir, cobrar a cada residente de forma tal que internalice completamente sus externalidades, permite alcanzar una asignación de los recursos óptima socialmente, aún al considerar contextos urbanos y la relación espacial. Debido a lo impracticable de estas medidas, con el paso de los años también se comenzaron a estudiar los esquemas de tarificación por congestión de segundo mejor, siendo Sullivan (1983b) y Kraus (1989) uno de los primeros modelos espaciales urbanos en abarcar esta temática. En la literatura más reciente tanto Mun et al (2003) como Verhoef (2005) analizan medidas de tarificación de esta clase, en particular del tipo cordón, siendo el resultado general que la pérdida relativa de bienestar de estas medidas no es demasiado grande en comparación con las medidas de tarificación de primer mejor.

En un principio, la mayoría de los modelos de economía urbana, al momento de representar los sistemas de transporte urbanos, suponían un único modo de transporte, sin embargo, algunos trabajos de investigación se encargaron de liberar este supuesto y estudiaron el efecto de introducir más de un modo en el análisis. Capozza (1973) es uno de los primeros trabajos de investigación en considerar más de un modo de transporte, a través de lo cual, estudia el efecto que el sistema de transporte tiene en la estructura del uso de terrenos de la ciudad. El autor enfoca su análisis en dos modos de transporte, uno intensivo en el uso de terrenos (carretera) y otro que no lo es (tren subterráneo o metro), discutiendo los efectos en el valor y uso de los terrenos y mostrando el efecto suburbanizador del modo metro. Haring et al (1976) analizan el impacto de los sistemas de transporte en la estructura urbana cuando se tiene la presencia de más de un modo de transporte. Ellos consideran tanto un modo de transporte privado como uno público, asumen que los usuarios conocen y minimizan sus costos y por medio de simulaciones numéricas encuentran que los diferenciales de renta de los terrenos entre el límite urbano y el CBD se reducen en comparación al caso de un solo modo de transporte. Sasaki (1989) analiza el impacto del cambio del sistema de transporte en la estructura espacial urbana para el caso en que existen dos modos de transporte competitivos. Contrario a lo obtenido cuando se considera sólo un modo de transporte, ante una disminución del costo de uno de los modos, el tamaño de la ciudad disminuye. De la misma manera Sasaki (1990) estudia los impactos de los cambios del sistema de transporte urbano y los cambios de ingreso en el bienestar de las personas y en la estructura espacial urbana, en un marco teórico en donde se tienen dos modos de transporte y el nivel de ingresos difiere entre dos grupos. Él muestra que una mejora en la tecnología de transporte no necesariamente mejora el nivel de bienestar de todos los hogares. Además, se muestra que un mejoramiento de uno de los modos de transporte puede llegar a producir una contracción en el tamaño de la ciudad en vez de una expansión.

Otra línea de investigación relacionada con transporte, que tuvo auge tempranamente, fue la explicación de los patrones residenciales en base a la mejora de la tecnología de transporte. En esta línea, Le Roy y Sonstelie (1983) explican dicho patrón para dos tipos de agentes, personas de bajo y alto ingreso, a través de la irrupción del automóvil. La argumentación de los autores establece que previo a la existencia de los automóviles las personas de mayores ingresos tendían a vivir cerca de los centros urbanos debido a lo costoso en términos de tiempo que era vivir lejos de éstos,

mientras que las personas de menor ingreso vivían en los suburbios, sin embargo, la aparición del automóvil dio acceso a los ricos a terrenos suburbanos más baratos, dando paso a una nueva configuración espacial en donde los ricos vivían en los suburbios y los pobres en el centro de la ciudad. Finalmente, los autores argumentan que la proliferación del automóvil hizo a este modo alcanzable para la mayoría de las personas haciendo nula la ventaja comparativa de los más ricos, con lo cual, éstos fueron retornando a los centros de las ciudades. En un estudio más actual Glaeser et al (2008) esbozan que el transporte público es la razón principal de porque la gente que vive en el centro de las ciudades es pobre. Su argumentación se basa en la idea de que el acceso al transporte público es mucho mejor en el centro de las ciudades, lo cual incentiva a que las personas que usan este medio, es decir, los de menores ingresos, a vivir cerca del centro de la ciudad, lo cual además es reforzado por el hecho de que la elasticidad ingreso de la demanda por terrenos es demasiado baja.

Una arista recientemente estudiada es la interacción entre la mejora tecnológica del transporte mediante la construcción de autopistas y su efecto en la suburbanización. Baum-Snow (2007a) incorporando heterogeneidad en la velocidad del viaje al CBD, a través de la modelación de autopistas radiales dentro del modelo monocéntrico, encuentra que el aumento de autopistas radiales reduce la población que se localiza cerca del centro, es decir, descentralización. De la misma manera en Baum-Snow (2007b) y Baum-Snow et al (2017) es posible ver un tratamiento empírico, que viene a reafirmar lo encontrado de manera teórica, en donde se encuentra que una nueva autopista que pasa por el centro de una ciudad reduce la población de este desde un 4% a un 18% para el caso de ciudades chinas y estadounidenses.

La elección de sistemas de transporte urbanos prácticamente no ha sido estudiada. En general, en este tipo de modelos, los costos de transporte se modelan exógenamente en vez de ser una decisión de política pública urbana. El único trabajo que aborda este tema es relativamente reciente y lo hace desde un enfoque de economía política. Brueckner y Selod (2006) analizan la elección del sistema de transporte internalizando ésta en un sencillo modelo urbano de equilibrio general y comparan el sistema de transporte socialmente óptimo con aquel elegido bajo un proceso de elección pública. Ellos esbozan que la elección de un sistema de transporte posee un “trade-off” continuo entre tiempo y dinero ya que una ciudad puede escoger un sistema de transporte con un alto costo monetario que puede ser muy rápido o uno más barato, pero más lento. Se encuentra que existe un sesgo hacia una menor inversión de la necesaria en la calidad de los sistemas de transporte en el contexto de ciudades heterogéneas.

En cuanto a subsidios de transporte, Brueckner (2005) estudia el efecto de éstos, tanto en los modos privado como público, sobre la expansión de las ciudades, de forma tal de entender si estos son una fuente de expansión urbana indeseable. Se muestra que, aún en el caso en que el efecto de la reducción del costo de transporte inducido por los subsidios de transporte es compensado por una mayor carga fiscal, la cual reduce la demanda por espacio de viviendas, se produce expansión urbana. El autor esboza que la eficiencia de la expansión espacial depende totalmente de la naturaleza de la tecnología de transporte, cuando el sistema exhibe retornos constantes a escala, los subsidios de transporte son ineficientes, es decir, estamos ante la presencia de sobreexpansión urbana, mientras que cuando los retornos son crecientes a escala, los subsidios son justificados y los efectos en el tamaño de la ciudad no son vistos como indeseables. De la misma manera Su y

DeSalvo (2008), desde una perspectiva teórica y empírica, también estudian el efecto de los subsidios de transporte en la expansión urbana, encontrando que el área urbana se contrae con un subsidio de transporte público y se expande con un subsidio que incentiva el uso del automóvil.

Hasta ahora ninguno de los trabajos revisados, que ha considerado el modo transporte público, realiza una modelación detallada de éste, de hecho, no se considera la existencia de estaciones o paraderos ni las consecuentes externalidades propias de los sistemas de transporte público como las bajadas y subidas de pasajeros, además de no tener en cuenta variables de diseño tales como: frecuencia, tarifa y espaciamiento entre paradas, entre otros, ni un análisis de la estructura de líneas de los sistemas. Ignorar estas características puede llevar a los tomadores de decisión a ideas erróneas respecto de lo que puede ser mejor para la sociedad al momento de rediseñar o modificar un sistema de transporte público, es por ello que es necesario incorporar una modelación más detallada. Dado lo anterior, es que en el último tiempo diversos autores se han dado cuenta de este vacío en la literatura surgiendo trabajos de investigación que se han hecho cargo, en algún punto, de estas aristas, los cuales se detallan a continuación.

Li et al (2012) es, a nuestro conocimiento, el primer trabajo de investigación, que modela teóricamente y de manera detallada, en el modelo monocéntrico, un sistema de transporte público con estaciones de detención considerando la interacción con la estructura urbana. Específicamente ellos investigan los efectos de que el gobierno otorgue los derechos de desarrollo de las viviendas que se encuentran en las cercanías de las estaciones al operador privado de un modo tren, lo que es conocido como el modelo “R+P” (de sus siglas en inglés “rail and property”), en el diseño de un servicio que sirve una ciudad monocéntrica lineal. Los autores consideran que el operador privado del tren maximiza sus propias ganancias, las cuales corresponden a la recaudación del modo tren y el desarrollo inmobiliario respectivo, mediante la elección de las variables de diseño de transporte público: longitud de la línea de tren, número y espaciamiento entre estaciones, frecuencia y tarifa. Se encuentra que este modelo de integración entre viviendas y tren puede cambiar el patrón de uso de suelo y el mercado inmobiliario. Contrario a los clásicos modelos monocéntricos, en donde el patrón de las variables de estructura urbana es monotónicamente creciente o decreciente (ver Figura 2.1), la inclusión de las estaciones de tren provoca que este patrón se rompa, tal como se muestra en la Figura 2.2, los cual es el resultado de las simulaciones numéricas de los autores.



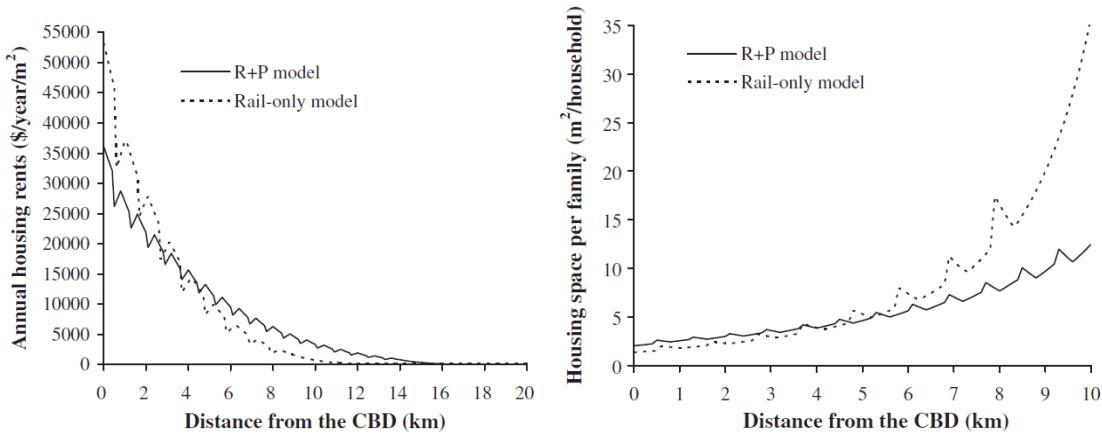


Figura 2.2: Precio de renta y tamaño de las viviendas según distancia al CBD para un modelo basado sólo en tren y el modelo “R+P”. Fuente: Li et al (2012).

De la misma manera como hacen Li et al (2012) para entender los cambios que induce el modelo “R+P” en la estructura urbana a través de simulaciones numéricas, Basso et al (2018) estudian la interrelación entre el transporte público y dicha estructura, mostrando de manera analítica como la introducción de estaciones de transporte público rompe el patrón no monótono de las diferentes variables de estructura urbana. Dichos autores toman como base el modelo de Brueckner (1987) para realizar una importante modificación en la estructura de costos de viajar al CBD a diario. Ellos realizan la observación de que la estructura lineal supuesta por Brueckner no necesariamente se mantiene cuando se incorporan estaciones de transporte público en la modelación. Además, ellos simplifican el análisis y suponen una ciudad monocéntrica lineal, es decir, colapsan todo el análisis a un radio del modelo monocéntrico clásico. Al incorporar estaciones de transporte público, las cuales ellos suponen equidistantes unas de otra y del CBD, el costo de acceso a las estaciones juega un rol muy relevante ya que los individuos pueden caminar aguas arriba o aguas abajo de la ubicación de su vivienda para poder acceder a una estación de transporte público, rompiendo la monotonía del costo de viaje ante cambios en la distancia al CBD, tal como se muestra en la siguiente figura:

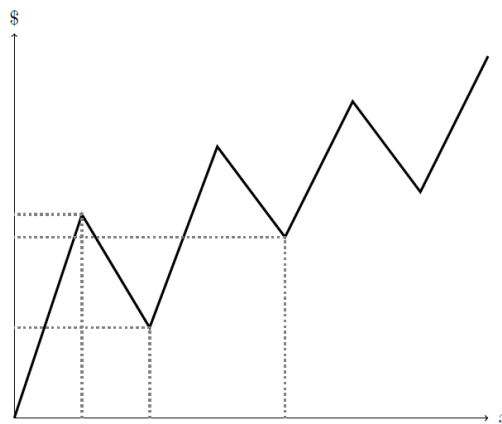


Figura 2.3: Costos de viajar a diario al CBD según distancia a éste ( $x$ ). Fuente: Basso et al (2018).

De esta manera, al igual que Brueckner, ellos muestran el comportamiento de la estructura urbana dada esta nueva estructura de costo, tal como se aprecia en las siguientes figuras:

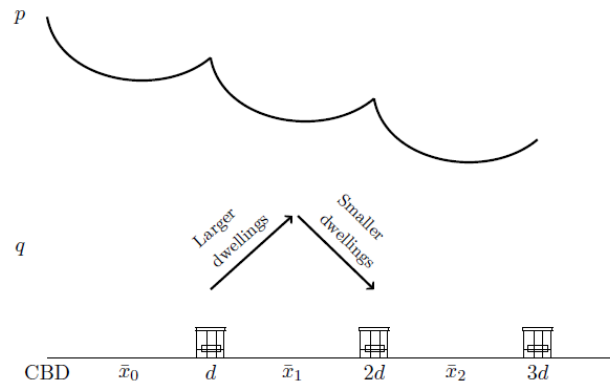


Figura 2.4: Precio de renta ( $p$ ) y tamaño ( $q$ ) de las viviendas según distancia al CBD. Fuente: Basso et al (2018).

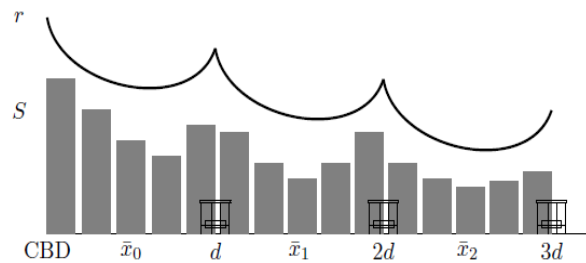


Figura 2.5: Precio de renta de terrenos ( $r$ ) y densidad estructural ( $S$ ) según distancia al CBD. Fuente: Basso et al (2018).

Finalmente, uno de los últimos aportes en los cuales se modela el modo transporte público de manera detallada es el trabajo de Mun y Taguchi (2018), quien se enfoca en estudiar la interrelación del diseño de transporte público con la estructura urbana a través del número de paraderos y longitud del corredor. Él muestra que aumentar el número de paraderos para una longitud de corredor dada, lo que en su modelo es equivalente a una disminución del espaciamiento entre paradas, reduce el límite urbano y aumenta las densidades dentro de la ciudad, mientras que la extensión de la longitud del corredor tiene el efecto contrario. La investigación considera dos tipos de problema: maximización del beneficio del operador de transporte y maximización del bienestar social, encontrando que la primera, conduce a una dispersión urbana excesiva debido a que al operador le conviene tener un menor número de estaciones en desmedro del tiempo de acceso de los usuarios.

## 2.2 Análisis Microeconómico y Diseño Óptimo de Transporte Público

La presente revisión de la literatura de análisis microeconómica y diseño de transporte público se divide en base a la estructura espacial de los trabajos revisados. En primer lugar, se revisan los principales aportes en líneas aisladas tanto con demanda variable como inelástica, luego el análisis se amplía en términos espaciales para abarcar líneas paralelas y estructuras de líneas para diferentes tipos de redes. Finalmente, en la última subsección se estudia la estructura interna de una línea de transporte a través de la distancia entre estaciones.

### 2.2.1 Líneas de Transporte Aisladas

El primer trabajo formal que se encarga de estudiar la optimización y economías de escala detrás del transporte de buses urbanos es el realizado por Mohring (1972) quien plantea un modelo microeconómico para optimizar la operación de un sistema de buses en un corredor aislado con demanda paramétrica. El autor encuentra que la frecuencia óptima debe ser proporcional a la raíz cuadrada de la demanda dando cuenta de las economías de escala asociadas a la operación de buses. Tal como muestran Jara-Díaz y Gschwender (2003a) el modelo de Mohring se puede expresar como una flota de buses  $B$  con un costo de operación  $c$  por vehículo-hora con lo cual se produce una frecuencia  $f$  que sirve a una cierta demanda  $Y$ . En principio el tiempo de viaje en vehículo  $t_v$  y acceso  $t_a$  de los usuarios se consideran constantes, mientras que el tiempo de espera  $t_w$  se asume como la mitad del intervalo de pasada entre vehículos. Por otra parte, el tiempo de ciclo se considera constante y se relaciona con la flota a través de la frecuencia por medio de la siguiente expresión:  $B = f \cdot t_c$ . De esta manera el valor de los recursos consumidos se puede expresar como:  $VRC = f t_c c + P_w \frac{1}{2f} Y + P_v t_v Y + P_a t_a Y$ , en donde,  $P_w$ ,  $P_v$  y  $P_a$  representan los valores del tiempo de espera, viaje en vehículo y acceso de los usuarios, respectivamente. Con esta expresión se da cuenta del compromiso que existe entre los costos del operador y el tiempo de los usuarios ya que, si bien una menor frecuencia podría convenirle al operador con el fin de abaratar costos, al hacer esto el tiempo de espera de los usuarios se ve completamente afectado. En un desarrollo posterior, Mohring (1972) también incluye el número de paradas de buses, espaciadas entre sí de manera equidistante, como variable de decisión. De la misma manera que el tiempo de acceso deja de ser constante, por lo anterior, tanto el tiempo de ciclo del bus como el tiempo de viaje en vehículo de los usuarios también dejan de serlo debido a que en esta nueva modelación éstas dependen del tiempo de subida y bajada de los pasajeros. El tiempo de ciclo con estas modificaciones, tal como muestran Jara-Díaz y Gschwender (2003a), se ve de la siguiente manera:  $t_c = t \frac{Y}{f} + t_r + t_{ad} n (1 - e^{-p})$ , en donde  $t$  es el tiempo de subida y bajada,  $\frac{Y}{f}$  es el número de pasajeros que suben a un bus dentro de un ciclo,  $t_r$  es el tiempo en movimiento de un vehículo durante un ciclo,  $t_{ad}$  es la penalidad temporal que tienen la aceleración y desaceleración del vehículo al momento de detenerse en una parada, siendo  $n$  el número de paradas y  $(1 - e^{-p})$  representa la probabilidad de detención. El tiempo de viaje de cada agente se expresa como una fracción del tiempo de ciclo y el tiempo de acceso se incluye en el modelo como una función del número de paraderos  $n$ . De lo

anterior se puede apreciar como el tiempo de ciclo va cambiando y complejizando el modelo en la medida que se van agregando nuevos fenómenos, en este caso la subida y bajada de pasajeros y el número de paradas como variable de decisión.

Jansson (1980) simplifica el modelo más elaborado presentado en Mohring (1972) eliminando el número de paradas como variable de decisión y asumiendo que los buses siempre se detienen en un paradero. De esta manera se mantiene el efecto de la subida y bajada de pasajeros en el tiempo de viaje en vehículo y en el tiempo de ciclo, pero ya no considera al tiempo de acceso variable. Cabe mencionar que al introducir todas estas modificaciones aún se mantiene el resultado de que la frecuencia óptima debe crecer menos que proporcionalmente con la demanda, es decir, se mantienen las economías de escala asociadas a la operación en un corredor de buses. Además de todo lo anterior, una contribución importante de Jansson, tal como muestran Jara-Díaz y Gschwender (2003a), es la extensión de su modelo para determinar el tamaño óptimo de los vehículos, para lo cual utiliza una relación lineal entre el costo de operación  $c$  y el tamaño de los vehículos  $K$ :  $c(K) = c_0 + c_1K$ , en donde  $c_0$  y  $c_1$  son constantes. Esta relación mostrada en Jansson (1980) ha sido ampliamente utilizada a lo largo de los años en la literatura microeconómica de transporte público al igual que como en este trabajo de investigación.

Las investigaciones revisadas hasta ahora tienen en común que minimizan el valor de los recursos consumidos, o dicho de otra manera minimizan costos, con una demanda paramétrica dada, con lo cual, no se captura el efecto que un mejor nivel de servicio puede tener sobre ésta. Kocur y Hendrickson (1982) es uno de los primeros trabajos de investigación en donde se incorpora demanda variable al diseño de servicios de buses, aunque cabe mencionar que su modelo no considera un corredor aislado. La incorporación de una demanda elástica hace necesario introducir algún modelo de partición modal, en donde se capturen tanto las características de servicio del sistema de transporte como su relación con el tiempo de los usuarios con su respectivo efecto sobre la demanda. En este caso, el enfoque, al considerar tanto a los usuarios como a los operadores de transporte en el diseño, cambia, ya no se minimizan los costos o el valor de los recursos consumidos, sino que, se maximiza el bienestar social, para lo cual se debe utilizar alguna medida de bienestar para los usuarios, siendo el excedente del consumidor extraído de la función de demanda la medida por excelencia. En el contexto de corredores aislados y demanda sensible a las características del sistema de transporte público existe una variedad de aportes realizados a lo largo de años de investigación. Dentro de las principales contribuciones se destacan la incorporación del efecto de las tasas de ocupación en el tiempo de espera y el cambio en la congestión y tiempos de viaje por el aumento de los usuarios de transporte público en Oldfield y Bly (1988), la incorporación del efecto del hacinamiento en el valor del tiempo de viaje en vehículo de los usuarios en Kraus (1991) y la incorporación de otras externalidades, tales como, el riesgo de accidentabilidad en Evans y Morrison (1997).

Finalmente, volviendo a modelos con demanda paramétrica, se tiene el trabajo de Jara Díaz y Gschwender (2003a) quienes extienden el modelo de Jansson (1980) incluyendo el tamaño de vehículo como variable de optimización a través de una restricción de capacidad y considerando la influencia del hacinamiento en el valor del tiempo en vehículo a través de una relación lineal. Con estas modificaciones encuentran que la tasa de ocupación de los vehículos de transporte no depende de la demanda y que el tamaño óptimo de éstos debe crecer menos que proporcionalmente con ésta,

al igual como ocurre con la frecuencia. Además, hacia el final de su trabajo de investigación los autores proponen un modelo general que incorpora los diversos aportes estudiados a lo largo de años de literatura microeconómica de diseño de transporte público, para ello incluyen en el valor de los recursos consumidos externalidades y proponen como variables de decisión: frecuencia, capacidad de los vehículos, gastos para reducir el riesgo de los accidentes, los retrasos en horario y externalidades, además del número de paradas. En esta propuesta de modelación se incluye la posible congestión entre buses ante aumentos de frecuencia, se vuelve a incorporar la estocasticidad en las detenciones en paraderos, algo ignorado por la mayoría de los trabajos a lo largo de los años, se incorpora el efecto de la congestión de pasajeros en el tiempo de subida y bajada de los pasajeros, la relación entre el tiempo de espera y la tasa de ocupación de los buses, la dependencia del valor del tiempo de viaje con el hacinamiento y el efecto de la accidentabilidad en los usuarios. A pesar de los esfuerzos por plantear un modelo que incorpore la mayor parte de lo que la literatura ha estudiado a lo largo de los años, existen al menos dos limitaciones a destacar: si bien se logra incorporar la posible congestión entre buses, la posible congestión con vehículos particulares es totalmente ignorada, y la atractividad que un mejor nivel de servicio puede provocar en la demanda y en consecuencia en una menor congestión.

### **2.2.2 Líneas de Transporte Paralelas**

Los primeros trabajos de investigación de la literatura de análisis microeconómico de transporte público se centraron en estudiar corredores de transporte aislados ignorando las dimensiones espaciales que son inherentes al área de transporte. Si bien, en el modelo no analítico de Mohring (1972) se incorpora el número de estaciones como variable de diseño, y con ello la distancia entre estaciones, se podría decir que esta es una de las pocas componentes espaciales que se integraron en los modelos de corredores aislados. Sin embargo, con el paso del tiempo esta literatura se fue ampliando al punto de que se integró una nueva componente espacial de interés en el área, la cual es el espaciamiento entre rutas paralelas de transporte público.

Chang y schonfeld (1991), modelan un área rectangular que es servida por líneas de transporte paralelas e igualmente espaciadas, la cual genera viajes con destino a un centro de actividad externo a dicha área. Al igual que en los modelos de corredores aislados se optimiza la frecuencia con la diferencia de que también el espaciamiento entre líneas y con ello el número de líneas se vuelve una variable de diseño del transporte público. De modo de obtener resultados analíticos se ignoran las externalidades de carga y descarga de los usuarios y con ello se encuentra, de manera muy similar a como ocurre en Mohring (1972), que la frecuencia óptima crece menos que proporcionalmente con la demanda. La principal diferencia radica en que, al incluir el acceso a través del espaciamiento entre líneas, se rompe la regla de la raíz cuadrada y se da paso a una raíz cúbica, es decir, ante aumentos de la demanda se debe aumentar la frecuencia menos que proporcionalmente que en comparación con el resultado de Mohring (1972), lo cual está directamente relacionado con la inclusión de la dinámica espacial en la modelación. El hecho de que se pueda decidir el número de líneas paralelas provoca que la frecuencia se deba ajustar en menor medida ante aumentos de la demanda.

### 2.2.3 Estructura de líneas

En los albores de la literatura microeconómica de transporte público, la estructura de líneas de los servicios de transporte era completamente ignorada ya que en los modelos estudiados todos los pares origen-destino se encontraban cubiertos por una única línea de bus. Sin embargo, existen casos en que puede ser eficiente tener diferentes estructuras de servicio de transporte sirviendo una red y considerar la opción de sistemas en base a transbordos. Es por ello que se hace necesario ampliar la mirada y analizar las diferentes maneras espaciales en que se puede servir la demanda de transporte público.

Uno de los trabajos pioneros en analizar la estructura espacial de los servicios de transporte bajo la mirada microeconómica, en un contexto de múltiples orígenes y destinos, es el trabajo de Jara-Díaz y Gschwender (2003b). Ellos, en una red de transporte simplificada (ver Figura 2.6), comparan servicios directos, es decir aquellos en los cuales no es necesario hacer transbordo, con servicios de tipo corredor, a través de la minimización de la suma del costo de los operadores y usuarios, encontrando que para altos niveles de demandas los servicios directos tienden a ser más eficiente que los corredores. Ellos concluyen que la ventaja de este tipo de estructura de servicios radica en la disminución de los costos de usuario al evitar los transbordos. Cabe mencionar que los autores hacen notar que la estructura en base a corredores es ampliamente superior cuando en la minimización de costos no se pondera a los usuarios.

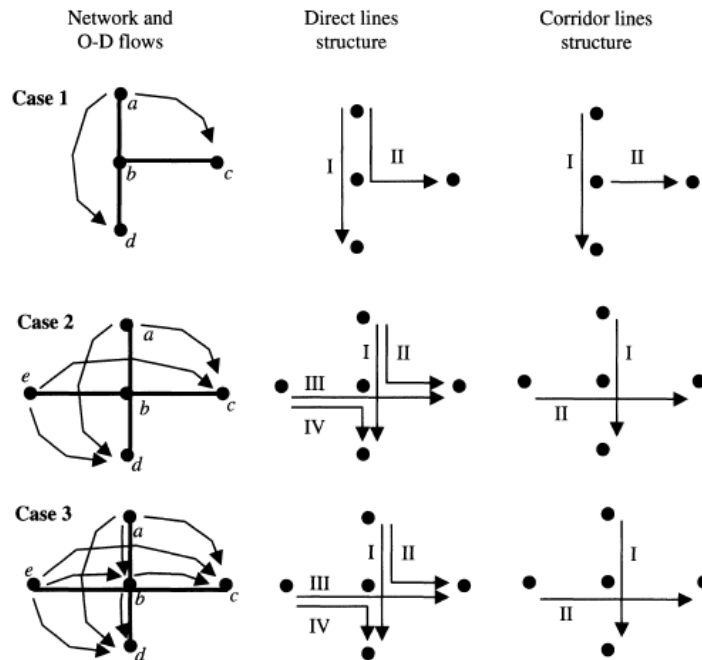


Figura 2.6: Estructura de línea directas y de corredor. Fuente: Jara-Díaz y Gschwender (2003b).

Con el paso de los años se ha seguido investigando la estructura de líneas de los servicios de transporte para diferentes tipos de estructura de red. En este contexto se tienen los trabajos de Jara-Díaz et al (2012) y Gschwender et al (2016), cuyas estructuras de líneas y estructura de red se presentan a continuación:

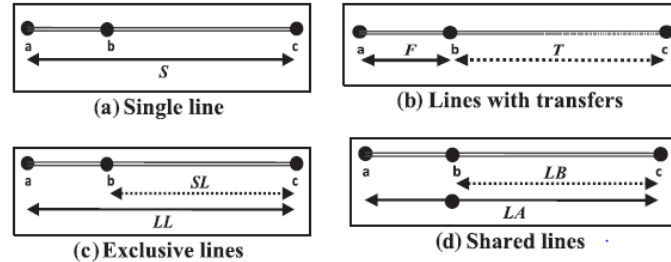


Figura 2.7: Estructura de líneas. Fuente: Jara-Díaz et al (2012).

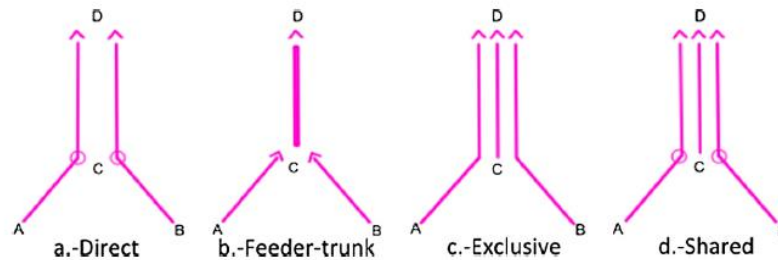


Figura 2.8: Estructura de línea directas. Fuente: Gschwender et al (2016).

Los autores en ambos trabajos utilizan un enfoque de minimización de costos para comparar diferentes estructuras de línea, principalmente directas (sin transbordo) con troncal alimentador, de modo de dilucidar cuál de éstas es óptima y bajo qué condiciones. Ellos muestran que, cuando la demanda es alta en todos los pares origen-destino, la estructura troncal alimentador no es atractiva, mientras que si la demanda es desbalanceada, y la mayor parte se concentra en el par origen destino que sirve el troncal, las líneas directas pierden su atractivo ya que las economías de densidad de la estructura troncal alimentador, es decir, el ahorro en los costos operacionales que pueden ser logrados por usar vehículos grandes en las principales avenidas y su baja o nula capacidad ociosa, superan la ventaja de que los usuarios no necesiten transbordar de las líneas directas. Posteriormente Jara Díaz et al (2018) estudian si la baja atraktividad del esquema troncal-alimentador encontrada en Gschwender et al (2016) es sólo por la simplicidad de la red o es un resultado general. Para ello extienden el modelo de cruz hacia periferias de forma tal de examinar el argumento de economías de densidad. Se encuentra que la estructura "hub and spoke" es en general la más atractiva, cuando no existe penalidad por transbordo, ya que no existe capacidad ociosa, lo que representa una clara ventaja en términos de costos para el operador. La única forma en que esta estructura no se vuelve conveniente es cuando predominan altamente las demandas de viajes largos (de periferia a periferia) ya que en estos casos los transbordos inducen grandes tiempos de ciclo con lo cual se equiparan los costos con las líneas directas y el tiempo de espera y en vehículo termina haciendo la diferencia. La estructura troncal alimentador nunca domina lo cual se debe al gran número de transbordos y su efecto en el usuario, además de los altos tiempos de ciclo que conlleva para el operador. Cabe mencionar que, si sólo se comparasen las líneas directas con

el esquema troncal alimentador, sin considerar la penalidad por transbordo, el esquema troncal alimentador solo es superior cuando predomina altamente la demanda de viajes cortos.

Fielbaum et al (2016) estudian las estructuras de líneas óptimas de transporte público en el caso de una estructura urbana paramétrica (Figura 2.9). Con este tipo de estructura los autores pueden diseñar tanto para una ciudad monocéntrica, policéntrica o dispersa dada previamente, aunque, ya que no era el objetivo de la investigación, se ignora la interacción que el transporte puede tener con estas estructuras. Los autores consideran cuatro estructuras de líneas tipo: troncal-alimentador, “hub-and-spoke”, exclusivas y directas y utilizan el enfoque de minimización de los recursos consumidos para dilucidar cual es la estructura más eficiente al considerar tanto a operadores de transporte público como a los usuarios. Se encuentra que en la medida que el CBD cobra importancia las líneas del tipo “hub-and-spoke” tienden a ser más eficientes, mientras que si los subcentros se vuelven los puntos de mayor atracción de viajes las líneas más eficientes son las del tipo troncal-alimentador ya que disminuyen la capacidad ociosa del sistema. A nivel general, en la medida que la demanda aumenta las líneas favorecidas son las exclusivas mientras que si la dispersión de los viajes disminuye lo son las líneas directas.

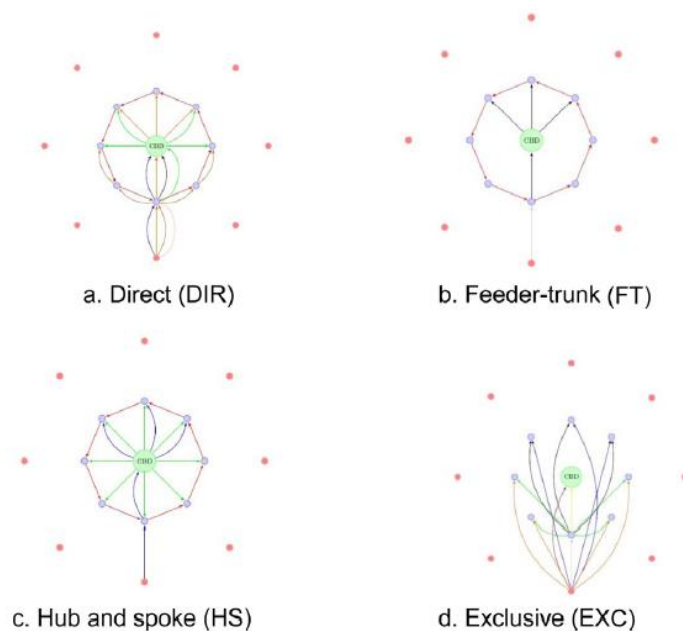


Figura 2.9: Estructura de líneas en el contexto de una ciudad paramétrica. Fuente: Fielbaum et al (2016).

## 2.2.4 Espaciamiento entre estaciones

Dentro de las componentes espaciales a estudiar en los sistemas de transporte público se encuentra el espaciamiento entre estaciones o paradas dentro de un cierto corredor de transporte. Como se ha visto a lo largo de esta revisión, la literatura microeconómica de transporte público en sus albores



se preocupó más de entender la relación entre niveles de frecuencia y demanda y los tamaños de buses óptimos, ignorando la dimensión espacial asociada. Ya hemos visto que con el paso del tiempo se incorporaron como variables de diseño el espaciamiento entre rutas paralelas y la estructura de líneas óptima para servir ciertas estructuras de demanda, sin embargo, un punto ignorado fue la estructura espacial entre estaciones, es decir, analizar la conveniencia de espaciar las paradas o estaciones de manera equidistante o variable, dicho de otra manera, que éstas se encuentren a diferente distancia unas de otras dependiendo de algún otro parámetro tal como la estructura de demanda asociada o cercanía al punto atractor de viajes. A continuación, se presentan los principales trabajos de investigación que han analizado esta dimensión espacial en sistemas de transporte.

Vuchic y Newell (1968) estudian el caso en que la población de un área viaja a un punto atractor de viajes que se encuentra en un extremo de una línea de tren. Su objetivo es determinar el número y localización de estaciones que minimiza el tiempo de viaje de los pasajeros. Es importante destacar que en su investigación la localización de las estaciones no afecta los límites del área servida. Ellos encuentran que cuando la densidad poblacional a lo largo de la línea es variable o cuando las subidas y bajadas son desbalanceadas lo óptimo es tener un espaciamiento entre estaciones no equidistante. Con una línea con carga acumulativa, si la densidad poblacional se distribuye de manera uniforme, la relación entre el número de pasajeros subiendo y pasajeros a bordo del tren cambia de manera monótonica a lo largo de la línea, induciendo una propensión decreciente del tren a detenerse en la medida que se acerca a destino ya que lo que se busca es disminuir el tiempo de viaje agregado. La principal conclusión de la investigación es que la densidad de estaciones depende de la relación de los pasajeros que están por subir en la línea y aquellos que van en el tren. De esta manera el espaciamiento entre estaciones debería ser monótonicamente creciente en el sentido de recorrido del tren, es decir, estaciones más separadas conforme el tren se acerca a destino. De la misma manera Vuchic (1969) estudia el espaciamiento óptimo entre estaciones de transporte público, pero esta vez para maximizar la demanda del sistema. Se encuentra que el espaciamiento entre estaciones debe ser creciente a tasas decrecientes en la dirección en que se acumula la demanda, es decir, hacia el CBD. El resultado es similar al de Vuchic y Newell (1968) con la salvedad de que para maximizar la demanda se tiene una mayor densidad de estaciones, lo que conlleva un tiempo de viaje mayor.

# Capítulo III

## 3 MODELO

Se considera una ciudad monocéntrica lineal que posee un sistema de transporte público que opera a lo largo de ésta con detenciones en un cierto número de paradas o estaciones. Todos los residentes viajan diariamente al CBD ya que ahí se encuentran sus puestos de trabajo. Se asume que sólo hay disponibilidad de dos modos de transporte: la caminata y el transporte público.

La ciudad se encuentra compuesta por una diversidad de agentes que juegan un rol en la dinámica de ésta. Por un lado, se encuentran los residentes o consumidores de viviendas quienes deciden su localización a lo largo de la ciudad y pagan por rentar una vivienda. Por otro lado, están los desarrolladores inmobiliarios quienes se encargan de construir las viviendas en terrenos urbanos que pertenecen a terratenientes ausentes, es decir, que no forman parte de la ciudad, quienes rentan sus terrenos para la construcción de infraestructura inmobiliaria. Además, existe un ente planificador que se encarga de diseñar el sistema de transporte público y un operador de transporte que se encarga de servir la ciudad siguiendo el diseño realizado. El sistema de transporte público diseñado por el planificador, como se verá más adelante, afecta los patrones urbanos de la ciudad, de esta manera, el ejercicio teórico que se realiza, a lo largo de esta investigación, consiste en que en una primera instancia se realiza el diseño del sistema de transporte público y luego en base a ese diseño se “construye” la ciudad o dicho de otro modo se encuentra un equilibrio urbano. Esta perspectiva de modelación tiene dos interpretaciones posibles: el modelo permite comparar ciudades que siguieron caminos diferentes, en cuanto a lo que diseño de transporte se refiere, o el modelo permite abordar equilibrios de largo plazo.

Cabe mencionar que por cómo se encuentra construido el modelo, la tecnología de transporte público a considerar podría ser tanto un sistema basado en buses como un tranvía o metro, sin embargo, en las simulaciones a realizar en los posteriores capítulos se utilizan parámetros consistentes con un sistema BRT (del inglés “Bus Rapid Transit”). Además, es importante destacar que la modelación, en términos temporales, sólo considera el periodo (de una o más horas) en que los residentes viajan al CBD y no el regreso desde sus puestos de trabajo hacia sus hogares.

En las siguientes subsecciones se analiza el problema que enfrentan los consumidores y los desarrolladores inmobiliarios para luego explicar la forma en que se determina el equilibrio urbano, describir la modelación del transporte público, el costo generalizado de viajes de los residentes y cómo se mide el bienestar social y el problema de maximización al cual se ve enfrentado el planificador.

### 3.1 Consumidores

Siguiendo el desarrollo de Brueckner (1987), las preferencias de los habitantes de la ciudad se modelan por una función de utilidad estrictamente cuasi-cóncava  $U(c, q)$ , la cual depende del consumo de vivienda  $q$ , el cual se mide en metros cuadrados de espacio interior (de piso o de planta), y del consumo de un conjunto de bienes  $c$ , denotado como bien compuesto, el cual incluye todos los bienes que no son vivienda. Cabe destacar que en el mundo real las viviendas se pueden caracterizar por muchos más atributos, mientras que en esta modelación suponemos que el único atributo relevante es el espacio. Además, se asume que el precio del bien compuesto está normalizado en uno y es el mismo en toda la ciudad, mientras que el precio de renta de las viviendas por metro cuadrado, el que se denota por  $p$ , puede variar con la distancia al CBD. La restricción presupuestaria de los individuos es de la forma:

$$I = c + pq + \rho(x), \quad (1)$$

En donde  $I$  es el ingreso de los individuos y  $\rho$  el costo de viajar diariamente al CBD, el cual depende de la distancia,  $x$ , a éste. Se asume que todos los residentes de la ciudad son idénticos, es decir, todos tienen el mismo nivel de ingreso y preferencias idénticas. El problema de maximización de utilidad individual se puede escribir como:

$$\begin{aligned} & \max_{\{c, q\}} U(c, q) \\ \text{s. a. } & I = c + pq + \rho(x). \end{aligned} \quad (2)$$

Despejando de la ecuación (1) el consumo de bien compuesto y reemplazándolo en la utilidad, el problema de maximización se puede reescribir como:

$$\max_{\{q\}} U(I - pq - \rho, q) = u, \quad (3)$$

en donde  $u$  es el máximo nivel de utilidad que puede alcanzar un individuo. De esta forma se desprende la siguiente condición de primer orden (CPO):

$$\frac{\partial U / \partial q}{\partial U / \partial c} = p, \quad (4)$$

la cual nos dice que la tasa marginal de sustitución entre el bien vivienda y el bien compuesto es igual al precio de renta de la vivienda. Como se han supuesto individuos idénticos, éstos alcanzan el mismo nivel de utilidad independiente de la distancia al CBD que posea su localización, lo cual queda expresado en la siguiente ecuación:

$$V(I - pq - \rho, q) = u, \quad (5)$$

la cual es una condición de equilibrio espacial, en donde  $V$  es el máximo nivel de utilidad alcanzable a precios de vivienda  $p$ . Cabe remarcar que la variación espacial del precio es clave para obtener niveles de utilidad idénticos a lo largo de la ciudad.

Finalmente es importante discutir el valor del tiempo en este modelo. Tal como se muestra en Basso et al (2018), el ingreso de los residentes se encuentra compuesto tanto de una parte fija, la cual no depende de las horas trabajadas  $E$  como de otra variable  $wW$ , en donde  $w$  es la tasa salarial por hora y  $W$  son las horas trabajadas por día. Ellos explican que la restricción presupuestaria originalmente se puede escribir como:

$$E + wW = c + pq + e, \quad (6)$$

en donde  $e$  es la tarifa cobrada en el transporte público. Por otra parte, la restricción temporal se puede escribir como:

$$T = W + L + t, \quad (7)$$

en donde  $T$  es el tiempo total disponible en un día, descontando el tiempo destinado a dormir y comer, entre otras cosas,  $L$  es el tiempo de ocio y  $t$  es el tiempo de viajar a diario al CBD de los residentes. Despejando  $W$  de la restricción presupuestaria se obtiene  $W = T - L - t$ , expresión que al ser reemplazada en la restricción de ingreso se puede ver de la siguiente manera:

$$E + w(T - L - t) = c + pq + e, \quad (8)$$

la cual al ser reordenada conlleva la siguiente expresión:

$$E + w(T - L) = c + pq + e + wt, \quad (9)$$

en donde  $E + w(T - L)$  corresponde al ingreso  $I$  y  $e + wt$  corresponde al costo generalizado de viajar al CBD diariamente  $\rho$  de la ecuación (1). Tal como en Becker (1965), se puede apreciar que el valor del tiempo en este modelo corresponde a la tasa salarial  $w$ . Cabe mencionar que el supuesto implícito que está detrás de esta aseveración es que el tiempo no tiene efecto en el nivel de utilidad.

## 3.2 Oferta inmobiliaria

Siguiendo Brueckner (1987) se tiene que existe una función de producción de los desarrolladores inmobiliarios (productores de viviendas)  $H(\kappa, L)$ , la cual es cóncava, tiene retornos constantes a escala, necesita de los insumos tierra  $L$  y capital  $\kappa$  para poder producir y se encuentra expresada en espacio interior o de planta (medido en kilómetros) contenido en una construcción. Cabe mencionar que la construcción se encuentra dividida implícitamente en viviendas del tamaño demandado por los consumidores. El espacio de piso o planta contenido en la construcción es alquilado por los residentes a precio  $p$ , mientras que la tierra y el capital son arrendados por los productores a precio  $i$  y  $r$ , respectivamente. Por todo lo anterior, el beneficio de la firma productora de viviendas se puede expresar como:

$$\pi = p \cdot H(\kappa, L) - i\kappa - rL. \quad (10)$$

Además, como la función posee retornos constantes a escala se puede desarrollar lo siguiente:

$$\pi = L \cdot (p \cdot H(\kappa/L, 1) - i\kappa/L - r), \quad (11)$$

en donde el ratio  $\kappa/L$  se puede ver como un índice de la altura de las construcciones. Este ratio, que a partir de ahora se denota como  $S$ , es conocido usualmente como densidad estructural. De esta forma, la función de producción de viviendas se puede reescribir como  $h(S)$ , la cual entrega el espacio interior o de planta de una construcción por unidad de suelo. La concavidad de la función de producción conlleva una productividad marginal del capital decreciente, lo cual da cuenta de que en la medida que las construcciones son más altas, al capital se le dan otros usos no tan productivos tales como, escaleras y ascensores, entre otras cosas ( $h''(S) < 0$ ). El desarrollador inmobiliario elige la densidad estructural de modo de maximizar su utilidad, con lo cual se tiene la siguiente condición de primer orden:

$$ph'(S) = i, \quad (12)$$

además, se tiene que, suponiendo largo plazo, las firmas no tienen beneficio (condición de beneficio nulo):

$$ph(S) - iS = r. \quad (13)$$

Es importante discutir el hecho de que en este modelo se ignora la durabilidad de las estructuras a través del supuesto de que el capital es perfectamente maleable, es decir, se puede transformar con facilidad. De hecho, en el modelo los productores pueden ajustar ambos insumos, tanto el capital y la tierra, fácilmente y sin ningún mayor costo, de ahí que se vean como alquiladores de los

insumos productivos más que compradores de estos. Si bien este supuesto puede parecer poco realista, se hace para simplificar el problema y darle manejabilidad analítica a éste.

### 3.3 Condiciones de equilibrio urbano

Para obtener el equilibrio urbano se necesitan dos condiciones. La primera de ellas se obtiene del hecho de que los desarrolladores inmobiliarios o productores de vivienda deben estar dispuestos a pagar un precio de renta mayor por los terrenos urbanos que el que se paga por los terrenos agrícolas ya que de otro modo los terratenientes seguirían destinando sus terrenos a fines agrícolas. Esto se traduce en que en el límite urbano el valor de renta de la terrenos debe ser igual al valor de renta de los terrenos agrícolas, lo cual queda determinado por la siguiente ecuación:

$$r(\bar{x}, l, \rho, u) = r_A. \quad (14)$$

Cabe mencionar que debido a la no monotonía de las variables que definen la estructura urbana, no necesariamente la totalidad de los terrenos que se encuentran dentro del límite urbano se destinan para desarrollos inmobiliarios. Tal como se muestra en la sección 4.6, con la incorporación de estaciones de transporte público en el modelo se pueden generar suburbios desconectados.

La segunda condición de equilibrio corresponde a que el total de la población urbana se debe localizar dentro del límite urbano de la ciudad,  $\bar{x}$ , es decir:

$$\int_0^{\bar{x}} D(x) dx = \Omega. \quad (15)$$

en donde  $\Omega$  es la población urbana total y  $D$  es la densidad poblacional, la cual es descrita por la siguiente ecuación:

$$D(x) = \frac{h(S)}{q}, \quad (16)$$

en donde, como ya se esbozó anteriormente,  $h(S)$  expresa el espacio interior o de planta contenido dentro de una construcción por unidad de tierra, mientras que  $q$  es el tamaño de una vivienda. Bajo el supuesto de que cada vivienda contiene a solo un habitante, la división entre ambas variables otorga el número de personas viviendo en una construcción por unidad de tierra.

Tal como discute Brueckner (1987), la interpretación de las condiciones depende de si la ciudad es abierta o cerrada, es decir, si hay o no inmigración. En el caso de una ciudad en donde no hay

inmigración, la población  $\Omega$  se encuentra dada exógenamente y el nivel de utilidad urbano  $u$  es endógeno al igual que el límite urbano  $\bar{x}$ , el cual actúa como un balanceador entre la demanda y oferta de viviendas. Ambas condiciones de equilibrio (ecuaciones (15) y (16)) se resuelven simultáneamente, de forma tal que el nivel de utilidad y el límite de la ciudad son funciones de los parámetros: población total, precio de renta agrícola, ingreso de los residentes y el costo de viajar al CBD. Por otra parte, en el caso de una ciudad abierta, el nivel de utilidad es fijado exógenamente, y la población pasa a ser determinada en el modelo. Esto debido a que la inmigración actúa como un balanceador de los niveles de utilidades de las economías, lo que se conoce como equilibrio regional, es decir, si una ciudad tiene mejores condiciones para sus habitantes, o dicho de otra manera, cada residente alcanza un mayor nivel de utilidad, los habitantes de otras ciudades con menores niveles de utilidad tienden a migrar hacia zonas con mayor bienestar, lo cual ocurre hasta que el nivel de utilidad alcanzado por los residentes de ambas ciudades se equilibra. En este caso las ecuaciones (15) y (16) se resuelven de manera recursiva y no simultánea. Cabe destacar que para efectos de esta investigación sólo consideraremos el caso de una ciudad cerrada.

### 3.4 Transporte Público

El sistema de transporte público se encarga de trasladar diariamente a los residentes de la ciudad al CBD, lugar en el que se encuentran sus puestos de trabajo. Para llevar a cabo esta tarea el sistema posee infraestructura que permite el libre tránsito hacia el CBD con  $N$  estaciones o paradas, las cuales se suponen, a menos que se diga lo contrario, separadas entre sí de manera equidistante por una distancia  $d$ . En la subsección 5.1.2 este supuesto se levanta de forma tal que el espaciamiento entre estaciones puede tener un comportamiento creciente, decreciente e inclusive no monótono con la distancia al CBD. Los intervalos de pasada entre vehículos de transporte, cuyo tamaño es  $K$ , se suponen uniformes descritos por una frecuencia  $f$ . Para hacer uso del sistema de transporte público se debe pagar una tarifa  $e$  la cual es única, independiente de la distancia al CBD y se cancela sólo una vez, es decir, en el caso en que existan transbordos y se utilicen dos servicios no hay un costo pecuniario adicional para el usuario.

La demanda de transporte público es variable, los usuarios pueden caminar al CBD o utilizar el sistema de transporte. La elección del modo de transporte se hace en base al menor costo generalizado de viaje de los usuarios, el cual puede variar en base al diseño del sistema de transporte público. La demanda por período (de una hora)  $Y$  queda definida por el ratio de la diferencia entre la población total y aquellos residentes que caminan al CBD y la cantidad de períodos  $\eta$ , medidos en intervalos de una hora, en los cuales se considera que los residentes viajan al CBD, tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y = \frac{\Omega - \int_0^{\bar{x}_0} D(x)}{\eta}, \quad (17)$$

en donde,  $\bar{x}_0$  representa la localización a partir de la cual la caminata deja de ser atractiva para los residentes, es decir,  $\int_0^{\bar{x}_0} D(x)$  es el número de residentes que camina al CBD. Cabe mencionar que

el ingreso de los usuarios al sistema de transporte público se asume uniforme por todo el corte temporal de modelación considerado, es decir, los  $\eta$  periodos.

El número máximo de estaciones de transporte público que puede tener una ciudad,  $N_{max}$ , queda limitado por la parte entera del ratio entre el límite urbano y el espaciamiento entre estaciones (ver ecuación (18)). De esta manera no se pueden tener estaciones que se encuentren más lejos del CBD de lo que permite el límite urbano.

$$N_{max} = \left\lfloor \frac{\bar{x}}{d} \right\rfloor. \quad (18)$$

Tal como se discutió al inicio del capítulo, el modelo soporta diferentes tecnologías de transporte público, tales como: BRT, tranvías o metros, sin embargo, como se verá en los capítulos posteriores, las simulaciones numéricas consideran parámetros consistentes con un sistema BRT.

El diseño del sistema de transporte público se puede describir por diversas variables sobre las cuales el planificador puede tomar una decisión, en particular, en esta investigación el diseño del sistema se puede caracterizar por: frecuencia, estructura espacial de las detenciones que habrá en el sistema, es decir, espaciamiento entre estaciones o paradas y cantidad de éstas, tarifa, tamaño de vehículo y estructuras de líneas de servicio. Respecto de esto último, se consideran tres tipos de estructura: línea única, línea con transbordo y líneas exclusivas, cada una de las cuales se procede a detallar a continuación.

### 3.4.1 Línea Única

Esta estructura de línea se entiende como un servicio que inicia su expedición en la última estación de transporte (la más cercana al límite urbano) con dirección al CBD, se detiene en cada estación aguas abajo, y al llegar a destino se devuelve en vacío para iniciar nuevamente otra expedición desde la última estación (ver Figura 3.1).

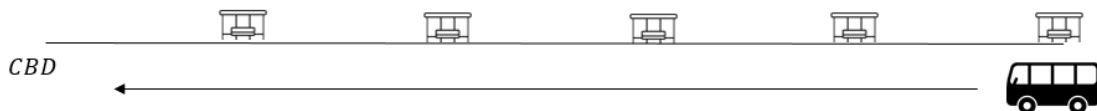


Figura 3.1: Estructura de línea única.

El tiempo de ciclo del sistema con este tipo de estructura se encuentra dado por la siguiente expresión:



$$t_c = \frac{2Nd}{v} + t_{ad} \cdot (N + 1) + (t_s + t_b) \cdot \frac{\Omega - \int_0^{\bar{x}_0} D(x)}{\eta f}, \quad (19)$$

en donde el primer término del lado derecho representa el tiempo de duración del ciclo sin considerar detenciones, el segundo término representa el tiempo adicional por aceleración y desaceleración de los vehículos y el último término representa el tiempo de subidas y bajada de pasajeros.

El tamaño de flota  $B$  necesario para poder servir la ciudad a una frecuencia  $f$  queda determinado por  $B = f \cdot t_c$ .

Los costos del operador de transporte público con este tipo de estructura de línea se pueden escribir de la siguiente manera:

$$C = c_{cp} \cdot B + 2 \cdot c_{op} \cdot L \cdot f + c_N \cdot N + c_L \cdot L, \quad (20)$$

en donde  $c_{cp}$  representa los costos de capital por vehículo y de personal, expresados en \$/bus-h,  $c_{op}$  son los costos de operación expresados en \$/bus-km, los cuales incluyen el consumo de combustible, lubricantes, neumáticos, mantenciones, entre otros gastos. Siguiendo lo desarrollado por Jansson (1980),  $c_{cp}$  y  $c_{op}$  se pueden representar por las siguientes expresiones:

$$c_{cp} = c_{10} + c_{11}K, \quad (21)$$

$$c_{op} = c_{20} + c_{21}K, \quad (22)$$

en donde ambos costos quedan en función del tamaño del vehículo de transporte público  $K$  de manera lineal. Por otra parte,  $c_N$  es el costo de infraestructura de las estaciones expresado en \$/estación-h y  $c_L$  es el costo de infraestructura sin considerar las estaciones o paradas de transporte público, lo cual se encuentra expresado en \$/km-h.

### 3.4.2 Líneas con transbordo

Un sistema de líneas con transbordo, en el contexto de la ciudad monocéntrica considerada, se entiende como dos tipos de servicios (ver Figura 3.2), uno que inicia su expedición en la estación de transbordo  $N'$  y viaja hasta el CBD y otro que recorre desde la última estación de transporte público  $N$  (la más alejada del CBD) hasta la estación de transbordo. En ambos casos, al igual como en la estructura de línea única, cuando los vehículos van en dirección contraria al CBD, éstos no

se detienen en ninguna estación, mientras que en caso contrario se detienen en cada una de las estaciones por las cuales pasan.

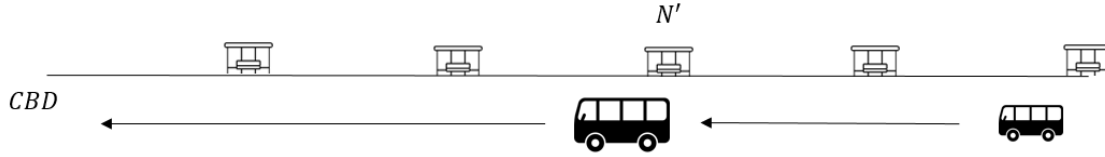


Figura 3.2: Estructura de líneas con transbordo.

La siguiente expresión representa el costo privado del sistema de transporte público de la ciudad al considerar una estructura de línea con transbordo:

$$C = c'_{cp} \cdot B' + c''_{cp} \cdot B'' + 2 \cdot c'_{cp} \cdot L' \cdot f' + 2 \cdot c''_{cp} \cdot L'' \cdot f'' + c_N \cdot N + c_L \cdot (L' + L''), \quad (23)$$

en donde,  $B''$ ,  $L''$ ,  $f''$ ,  $c''_{cp}$ , y  $c''_{op}$  son el tamaño de flota, largo de ruta, frecuencia, costo de capital y personal y costo operacional del servicio que cubre el área de la ciudad posterior a la estación de transbordo (la más cercana al límite urbano), mientras que  $B'$ ,  $L'$ ,  $f'$ ,  $c'_{cp}$  y  $c'_{op}$  son los mismos parámetros, pero del servicio que cubre la zona más cercana al CBD (anterior a la estación de transbordo). Las expresiones que describen el costo de capital y operación (ver ecuaciones (24), (25), (26) y (27)) son diferentes al caso de una sola línea ya que se tienen dos flotas con diferente tamaño de vehículos.

$$c'_{cp} = c'_{10} + c'_{11}K', \quad (24)$$

$$c''_{cp} = c''_{10} + c''_{11}K'', \quad (25)$$

$$c'_{op} = c'_{10} + c'_{11}K', \quad (26)$$

$$c''_{op} = c''_{10} + c''_{11}K'', \quad (27)$$

en donde  $K'$  y  $K''$  son el tamaño de vehículo del servicio que cubre el área más cercana al CBD y el área posterior a la estación de transbordo, respectivamente. El tamaño de flota de cada una de las líneas que recorren la ciudad se describe por las siguientes expresiones:

$$B' = f' \cdot t'_c, \quad (28)$$

$$B'' = f'' \cdot t''_c, \quad (29)$$

en donde  $t'_c$  y  $t''_c$  son el tiempo ciclo del servicio que cubre el área más cercana al CBD y el área posterior a la estación de transbordo, respectivamente. Estos se describen por las siguientes ecuaciones:

$$t'_c = \frac{2N'd}{v} + t_{ad} \cdot (N' + 1) + (t_s + t_b) \cdot \frac{\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_{N'}} D(x)}{\eta f'}, \quad (30)$$

$$t''_c = \frac{2(N-N')d}{v} + t_{ad} \cdot (N - N' + 1) + (t_s + t_b) \cdot \frac{\int_{\bar{x}_{N'}}^{\bar{x}} D(x)}{\eta f''}, \quad (31)$$

en donde  $\bar{x}_{N'}$  representa la localización hasta donde es atractivo utilizar el sistema sin incurrir en un transbordo. De esta manera  $\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_{N'}} D(x)$  representa los residentes que utilizan sólo el recorrido que sirve la zona más cercana al CBD y  $\int_{\bar{x}_{N'}}^{\bar{x}} D(x)$  representa a aquellos usuarios que deben incurrir en un transbordo para llegar al centro de la ciudad.

### 3.4.3 Líneas Exclusivas

La estructura de líneas exclusivas se entiende como dos servicios, uno que recorre la ciudad desde la última estación  $N$  (la más lejana del CBD) y va deteniéndose en cada estación hasta una estación intermedia  $N^*$  para luego seguir sin detenerse hasta el CBD y otro que comienza su recorrido en la estación  $N^* - 1$  y sirve la parte restante de la ciudad, es decir, la zona más cercana al CBD (ver Figura 3.3).

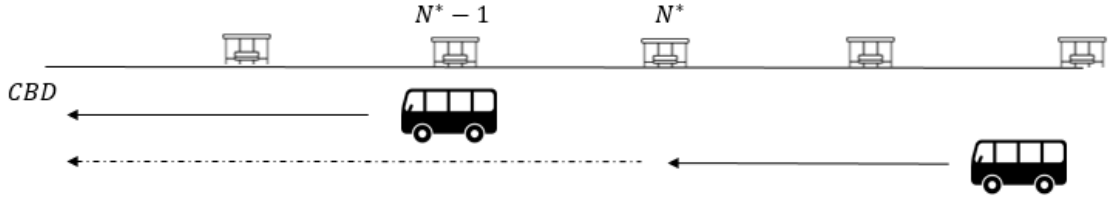


Figura 3.3: Estructura de líneas exclusivas.

El costo privado del sistema al considerar una estructura de líneas exclusivas se puede representar por la siguiente expresión:

$$C = c_{cp}^* \cdot B^* + c_{cp}^{**} \cdot B^{**} + 2 \cdot c_{cp}^* \cdot L^* \cdot f^* + 2 \cdot c_{cp}^{**} \cdot L^{**} \cdot f^{**} + c_N \cdot N + c_L \cdot (L^* + L^{**}), \quad (32)$$

en donde,  $B^{**}$ ,  $L^{**}$ ,  $f^{**}$ ,  $c_{cp}^{**}$ , y  $c_{op}^{**}$  son el tamaño de flota, largo de ruta, frecuencia, costo de capital y personal y costo operacional del servicio que cubre los suburbios, mientras que  $B^*$ ,  $L^*$ ,  $f^*$ ,  $c_{cp}^*$  y  $c_{op}^*$  son los mismos parámetros, pero para el servicio que cubre la zona más cercana al CBD. Las

expresiones que describen el costo de capital y operación (ver ecuaciones (33), (34), (35) y (36)) son diferentes para cada servicio debido a que el tamaño de los vehículos que sirven el suburbio es diferente del tamaño de los que sirven la zona cercana al CBD.

$$c_{cp}^* = c_{10}^* + c_{11}^* K^*, \quad (33)$$

$$c_{cp}^{**} = c_{10}^{**} + c_{11}^{**} K^{**}, \quad (34)$$

$$c_{op}^* = c_{20}^* + c_{21}^* K^*, \quad (35)$$

$$c_{op}^{**} = c_{20}^{**} + c_{21}^{**} K^{**}, \quad (36)$$

en donde  $K^*$  y  $K^{**}$  son el tamaño de vehículo del servicio que cubre el área más cercana al CBD y los suburbios, respectivamente. El tamaño de flota de cada una de las líneas que recorren la ciudad se describe por las siguientes expresiones:

$$B^* = f^* \cdot t_c^*, \quad (37)$$

$$B^{**} = f^{**} \cdot t_c^{**}, \quad (38)$$

en donde  $t_c^*$  y  $t_c^{**}$  son el tiempo ciclo del servicio que cubre el área más cercana al CBD y la zona de los suburbios, respectivamente. Estos se describen por las siguientes ecuaciones:

$$t_c^* = \frac{2N^*d}{v} + t_{ad} \cdot (N^* + 1) + (t_s + t_b) \cdot \frac{\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_{N^*-1}} D(x)}{\eta}, \quad (39)$$

$$t_c^{**} = \frac{2Nd}{v} + t_{ad} \cdot (N - N^* + 2) + (t_s + t_b) \cdot \frac{\int_{\bar{x}_{N^*-1}}^{\bar{x}} D(x)}{\eta}, \quad (40)$$

en donde  $\bar{x}_{N^*-1}$  representa la localización hasta donde es atractivo utilizar el servicio que recorre la zona más cercana al CBD. De esta manera  $\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_{N^*-1}} D(x)$  representa a los residentes que utilizan sólo el recorrido que sirve la zona más cercana al CBD y  $\int_{\bar{x}_{N^*-1}}^{\bar{x}} D(x)$  representa a aquellos usuarios que utilizan la línea que sirve los suburbios.

### 3.4.4 Espaciamiento variable

Hasta ahora el espaciamiento entre estaciones se ha modelado como un escalar  $d$ , es decir, suponiendo equidistancia entre éstas. Sin embargo, si como Vuchic y Newell (1968) y Vuchic (1969), se quisiera estudiar el espaciamiento óptimo como función de la distancia al CBD se hace necesario replantear la modelación.

Para modelar espaciamento variable entre estaciones según distancia al centro de la ciudad se crea una función  $d(n)$  que entrega la distancia al CBD de la estación  $n$ :

$$d(n) = \begin{cases} \phi, & n = 1 \\ \phi + \gamma, & n = 2 \\ \phi + \gamma + \gamma \sum_{i=1}^{n^*-2} \underline{\delta}^i, & n \leq n^* \quad \text{con } n^* \geq 3 \\ \phi + \gamma + \gamma \sum_{i=1}^{n^*-2} \underline{\delta}^i + \gamma \sum_{i=1}^{n-n^*} \bar{\delta}^i, & n > n^* \end{cases} \quad (41)$$

De esta manera el espaciamento entre estaciones dado por la función  $\varepsilon(n)$ , la cual indica la distancia entre la estación  $n$  y la estación  $n - 1$ , se puede ver de la siguiente manera:

$$\varepsilon(n) = \begin{cases} \phi, & n = 1 \\ \gamma, & n = 2 \\ \gamma \underline{\delta}^{n-2}, & n \leq n^* \quad \text{con } n^* \geq 3 \\ \gamma \underline{\delta}^{n^*-2} \bar{\delta}^{n-n^*}, & n > n^* \quad \text{con } n^* \geq 3 \end{cases} \quad (42)$$

en donde  $\phi$  representa la distancia al CBD de la primera estación,  $\gamma$  el espaciamento entre la primera y segunda estación,  $\underline{\delta}$  un parámetro mayor a cero que permite que la distancia entre estaciones a partir de la segunda estación y hasta la estación  $n^*$  crezca o decrezca conforme a la lejanía del CBD y  $\bar{\delta}$  un parámetro, de las mismas características de  $\underline{\delta}$ , que permite el mismo efecto pero a partir de la estación  $n^*$ . De esta manera se permite modelar un comportamiento constante ( $\underline{\delta}, \bar{\delta} = 1$ ), creciente ( $\underline{\delta}, \bar{\delta} > 1$ ), decreciente ( $\underline{\delta}, \bar{\delta} < 1$ ) y no monótono ( $\underline{\delta} < 1, \bar{\delta} > 1$  o  $\underline{\delta} > 1, \bar{\delta} < 1$ ) del espaciamento entre estaciones conforme aumenta la distancia al CBD a partir de la segunda estación de transporte público.

### 3.5 Costo generalizado de viaje de los residentes

Cada residente debe viajar diariamente al CBD ya que en éste se concentran sus puestos de trabajo, es por ello que los costos de viaje dependen de la distancia de la localización respecto al centro de la ciudad. En general este costo se compone de la tarifa de transporte público y el costo del tiempo de viaje asociado para llegar al CBD, el cual a su vez se compone del costo de acceso a las estaciones, el costo dado por el tiempo de viaje en vehículo y el costo de espera. En el caso de los residentes que no utilizan el transporte público, debido a que caminar al CBD es más atractivo, su costo sólo se encuentra asociado a una componente temporal. La siguiente ecuación representa el

costo de viajar a diario al CBD,  $\rho(x)$ , de aquellos individuos que caminan y residen a una distancia  $x$  de éste:

$$\rho(x) = w \cdot \frac{x}{\mu}, \quad (43)$$

en donde  $\mu$  es la velocidad de caminata. De esta manera  $\frac{x}{\mu}$  es el tiempo que demora el individuo caminando a su puesto de trabajo, el cual es valorado en la tasa salarial por hora  $w$ .

El costo generalizado de los usuarios de transporte público se ve de manera diferente según la estructura de línea del sistema, a continuación, se muestran y explican las expresiones utilizadas en cada uno de los casos correspondientes.

El caso más sencillo corresponde a cuando el sistema de transporte posee una línea única, en este escenario el costo generalizado de un individuo que reside en una localización  $x$  y camina aguas abajo a una estación  $n$  se puede escribir de la siguiente manera:

$$\rho(x) = e + w \cdot \frac{x-nd}{\mu} + \frac{w}{2f} + w \cdot \left( \frac{nd}{v} + n \cdot t_{ad} + t_s \cdot \frac{\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_{n-1}} D(x)dx}{\eta f} + t_b \cdot \frac{\Omega - \int_0^{\bar{x}_0} D(x)dx}{2\eta f} \right), \quad (44)$$

en donde  $v$  es la velocidad cruceo a la cual circulan los vehículos de transporte público,  $\eta$  es el número de períodos considerados para que todos los residentes viajen al CBD en un día laboral y  $\bar{x}_{n-1}$  es el punto en donde los residentes se encuentran indiferentes entre caminar a la estación  $n$ , la cual se encuentra aguas arriba de su localización, o caminar a la estación  $n - 1$ . Las componentes del lado derecho de la ecuación (44) son la tarifa de transporte público, el costo de acceso a la estación, el costo de espera y el costo de viaje en vehículo, de izquierda a derecha respectivamente. El tiempo de viaje en vehículo, el cual es la expresión entre paréntesis del último término del lado derecho, posee cuatro componentes, las cuales de izquierda a derecha son: i) tiempo de viaje cuando el vehículo está en movimiento sin considerar detenciones, ii) penalidad por las pérdidas en aceleración y desaceleración del vehículo de transporte cada vez que se detiene en una estación aguas abajo, (iii) tiempo de subida que imponen los pasajeros que suben en las estaciones aguas abajo (externalidad de carga) y (iv) externalidad de descarga, es decir, el tiempo extra que los usuarios imponen sobre otros usuarios al bajar en el CBD. El tiempo de bajada por pasajero  $t_b$  se encuentra multiplicado por la carga en los vehículos de transporte, la cual se divide en dos ya que suponemos que en promedio cada individuo espera al bajar la mitad del tiempo de bajada total. De la misma manera el tiempo de subida  $t_s$  se encuentra multiplicado por la cantidad de pasajeros que se suben en las estaciones aguas abajo. El tiempo de acceso  $\frac{x-nd}{\mu}$  es el tiempo de caminata a velocidad constante  $\mu$  desde la localización  $x$  aguas arriba de la estación ubicada a una distancia  $nd$  del CBD. Cabe mencionar que cuando un individuo camina aguas arriba a una estación  $n$ , el

único cambio en el costo generalizado mostrado anteriormente se da en su tiempo de acceso, el cual ahora es:  $\frac{nd-x}{\mu}$ .

Cuando el sistema de transporte es servido a través de una estructura de línea con transbordo, el costo generalizado de aquellos usuarios que no transbordan se ve de la misma manera que en el caso anterior (ver ecuación (44)), sin embargo, para aquellos usuarios que caminan aguas abajo a una estación  $n$  y necesariamente deben transbordar, su costo generalizado queda descrito por la siguiente ecuación:

$$\rho(x) = e + w \cdot \frac{(x-nd)}{\mu} + w \cdot \left( \frac{1}{2f'} + \frac{1}{2f''} \right) + w \cdot \left( \frac{Nd}{v} + n \cdot t_{ad} + t_{tr} + t_s \cdot \left( \frac{\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_{N'-1}} D(x) dx}{\eta f'} + \frac{\int_{\bar{x}_{N'}}^{\bar{x}_{n-1}} D(x) dx}{\eta f''} \right) + t_b \cdot \left( \frac{\Omega - \int_0^{\bar{x}_0} D(x) dx}{2\eta f'} + \frac{\int_{\bar{x}_{N'}}^{\bar{x}} D(x) dx}{2\eta f''} \right) \right), \quad (45)$$

en donde las principales diferencias respecto del costo generalizado presentado en la ecuación (44) se dan en el tiempo de espera, externalidad de carga y descarga y la adición de una penalidad de transbordo. Los usuarios que realizan el transbordo deben esperar dos veces por el servicio de transporte público, la primera vez en la estación cercana a su residencia y la segunda en la estación de transbordo, con lo cual el tiempo de espera se ve de la siguiente manera:  $\frac{1}{2f'} + \frac{1}{2f''}$ . En el caso de la externalidad de carga, los usuarios que transbordan tienen un leve beneficio temporal debido a que no perciben el tiempo de subida de los usuarios que abordan el sistema en la estación de transbordo, aunque por el lado de la externalidad de descarga perciben dos veces el tiempo de bajada de aquellos usuarios que transbordan con ellos. Finalmente, cabe mencionar que a lo largo de los años se ha estudiado la importancia en la elección de viaje de realizar transbordos (ver Currie, 2005), es por ello que se considera una penalidad temporal,  $t_{tr}$ , la cual corresponde al tiempo de viaje adicional (horas en vehículo equivalente) que perciben los usuarios por el solo hecho haber interrumpido su viaje debido a la necesidad de transbordar para llegar a destino. Cabe recalcar que este no es un tiempo real sino más bien la percepción, en términos temporales, que los usuarios tienen del transbordo. De esta manera la penalidad por transbordo queda dada por el producto entre el tiempo adicional percibido  $t_{tr}$  y el valor del tiempo.

En el caso de las líneas exclusivas el cambio en el costo generalizado de viaje se produce tanto en los residentes que utilizan el servicio de transporte público que sirve la zona más cercana al CBD como en aquellos que utilizan el servicio que sirve los suburbios. En el caso de los primeros la principal diferencia, respecto de la ecuación (44), radica en que la externalidad de descarga impuesta sobre los usuarios es menor, mientras que para los segundos tanto la externalidad de carga como de descarga es menor.

A continuación, se presenta el costo de viaje generalizado de los residentes que utilizan el servicio que sirve la zona más cercana al CBD y caminan aguas abajo para abordar el sistema en una estación  $n$ :

$$\rho(x) = e + w \cdot \frac{(x-nd)}{\mu} + \frac{w}{2f^*} + w \cdot \left( \frac{nd}{v} + n \cdot t_{ad} + t_s \cdot \frac{\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}^{n-1}} D(x)dx}{\eta f^*} + t_b \cdot \frac{\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}^{N^*-1}} D(x)dx}{2\eta f^*} \right), \quad (46)$$

en donde se puede apreciar que la externalidad de descarga no se encuentra dada por todos los residentes de la ciudad, sino que sólo por los usuarios que utilizan el servicio que sirve la zona más cercana al CBD.

La siguiente ecuación representa el costo de viaje generalizado de los residentes que utilizan el servicio que sirve la zona más lejana al CBD:

$$\rho(x) = e + w \cdot \frac{(x-nd)}{\mu} + \frac{w}{2f^{**}} + w \cdot \left( \frac{nd}{v} + n \cdot t_{ad} + t_s \cdot \frac{\int_{\bar{x}_{N^*-1}}^{\bar{x}^{n-1}} D(x)dx}{\eta f^{**}} + t_b \cdot \frac{\int_{\bar{x}_{N^*-1}}^{\bar{x}} D(x)dx}{2\eta f^{**}} \right), \quad (47)$$

en donde se puede apreciar que los usuarios que utilizan el servicio que sirve los suburbios no están afectos a la externalidad de carga y descarga de los individuos que residen en las cercanías del CBD.

### 3.6 Bienestar y óptimo social

El bienestar social es la agregación de los diferentes beneficios netos percibidos en la ciudad. En el caso de este modelo dichos beneficios vienen dados por el beneficio privado de la operación de transporte público, el valor generado por los terrenos urbanos y el cambio en el nivel de bienestar de los residentes dado por los cambios en las características del sistema de transporte, que a su vez induce cambios en el precio de renta de viviendas y terrenos, densidad poblacional y estructural, límite urbano y tamaño de viviendas, es decir, el cambio total de toda la estructura urbana de la ciudad. En términos prácticos, la idea de que el diseño del sistema de transporte público modifica toda la estructura urbana, o dicho de otra manera, que la ciudad se construye en base al diseño preestablecido puede parecer un poco extraña, pero dicho constructo teórico se puede interpretar de dos maneras: los efectos de muy largo plazo del diseño del sistema de transporte público o la



comparación de dos ciudades que tomaron rumbos diferentes en cuanto a sus sistemas de transporte.

El beneficio de los residentes se mide a través de la variación compensatoria. Ésta, en su enfoque económico clásico, corresponde al cambio de ingreso que compensa exactamente el efecto de la variación del precio de un bien o una canasta de bienes en la utilidad. En este caso, al considerar la interrelación entre la estructura urbana y el diseño del sistema de transporte público, corresponde al cambio en el ingreso que compensa exactamente el efecto de la variación de las variables de diseño de transporte público en la utilidad. De esta manera se logra capturar tanto el beneficio temporal que genera el sistema de transporte público hacia los residentes como la variación en el bienestar dada por el cambio de toda la estructura urbana.

Suponiendo que existe un cierto diseño de transporte público inicial cualquiera, el cual se denota con el supraíndice cero, el nivel de utilidad de equilibrio urbano asociado a éste queda representado por la siguiente ecuación:

$$u^0 = u(I, r_A, \rho(\bar{x}^0, e^0, f^0, d^0, N^0)). \quad (48)$$

Si el diseño del sistema de transporte público es modificado el equilibrio urbano también se modifica, con lo cual, se alcanza un nuevo nivel de utilidad de equilibrio, el que se denota con supraíndice uno y queda representado por la siguiente ecuación:

$$u^1 = u(I, r_A, \rho(\bar{x}^1, e^1, f^1, d^1, N^1)). \quad (49)$$

Para calcular el beneficio de los residentes que se logra con este nuevo diseño es necesario preguntarse cuál es el ingreso que se les debería quitar, dado este nuevo diseño, para alcanzar el mismo nivel de utilidad inicial. En la siguiente ecuación,  $VC$  representa la variación compensatoria:

$$u^0 = u(I - VC, r_A, \rho(\bar{x}^0, e^0, f^0, d^0, N^0)). \quad (50)$$

Como el modelo supone que los residentes de la ciudad son idénticos, la variación compensatoria de éstos también lo es, por lo cual, basta con multiplicar la variación compensatoria de un individuo por la población total para calcular el beneficio agregado a nivel de ciudad.

El beneficio generado por el sistema de transporte público,  $\pi_{TP}$ , sin considerar lo relacionado al tiempo de los usuarios viene dado por la diferencia entre sus ingresos y costos. Los primeros corresponden a lo recaudado por el cobro de la tarifa a cada usuario del sistema, mientras que los segundos corresponden a lo asociado a operación, capital e infraestructura. De esta manera el beneficio, en el caso de una línea de transporte única, queda descrito por la siguiente expresión:

$$\pi_{TP} = e \cdot \frac{\Omega - \int_0^{\bar{x}_0} D(x)}{\eta} - (c_{cp} \cdot B + 2 \cdot c_{op} \cdot L \cdot f + c_N \cdot N + c_L \cdot L). \quad (51)$$

En el caso en que la estructura de líneas del sistema corresponda a una línea con transbordo o líneas exclusivas, basta con modificar el segundo término del lado derecho de la ecuación (51), es decir, la componente de costos, por las ecuaciones (23) y (32), respectivamente.

En cuanto al valor generado por los terrenos urbanos, se debe considerar que existe un costo de oportunidad asociado al uso de este tipo de terrenos, es decir, destinarlos para fines agrícolas. De esta manera el beneficio generado por los terrenos urbanos,  $\pi_T$ , viene dado por la siguiente expresión:

$$\pi_T = \int_0^{\bar{x}} (r(x) - r_A) dx. \quad (52)$$

Cabe mencionar que en este modelo los terratenientes se consideran agentes ausentes (en inglés “absentee landlords”), es decir, el valor generado por los terrenos urbanos no es percibido o repartido por ningún residente o agente en particular que forme parte de la ciudad (ver por ej: Fujita, 1989; Bertaud y Brueckner, 2005; Brueckner, 2005).

El óptimo social se encuentra dado por el máximo bienestar alcanzable por la sociedad en base al diseño de transporte público realizado, es decir, la combinación entre estructura de líneas, frecuencias, tarifa, tamaño de vehículo y estructura espacial de las detenciones a lo largo de la ciudad que generan el mayor beneficio social. Para encontrar el óptimo social se debe resolver un problema de optimización restringido para cada una de las estructuras de líneas a analizar, de esta manera, luego sólo basta con comparar el máximo beneficio obtenido en cada caso para encontrar el diseño del sistema que trae mayores beneficios a la sociedad. A continuación, se aprecia el problema de optimización para el caso de línea única:

$$\begin{aligned} \max_{\{f, e, K, d, N\}} \quad & \Omega \cdot VC + \pi_{TP} + \pi_T \\ \text{s. a} \quad & \frac{\Omega - \int_0^{\bar{x}_0} D(x)}{\eta f} \leq K. \end{aligned} \quad (53)$$

en donde  $\frac{\Omega - \int_0^{\bar{x}_0} D(x)}{\eta f}$  es la cantidad de pasajeros por vehículo. Cabe hacer notar que, como el tamaño de vehículo,  $K$ , sólo afecta la función objetivo de manera negativa, el tamaño de vehículo en el óptimo social tomará siempre el menor valor posible, es decir, quedará dado por el ratio entre la demanda de pasajeros de transporte público y la frecuencia.

Finalmente, la única modificación del problema de maximización cuando se considera una estructura de línea con transbordo (ver ecuación (54)) o líneas exclusivas (ver ecuación (55)), respecto del caso ya mostrado (ver ecuación (53)), consiste en pasar a tener dos frecuencias y dos tamaños de vehículo como variable decisión y dos restricciones de capacidad, una por cada línea de la estructura, además de la variable de decisión de localización de la estación de transbordo y localización de la estación a partir desde la cual se tiene una línea exclusiva para los suburbios, en el caso de la estructura de líneas exclusivas.

$$\begin{aligned}
& \max_{\{f', f'', K', K'', e, d, N, N'\}} \Omega \cdot VC + \pi_{TP} + \pi_T \\
& \text{s. a} \quad \frac{\Omega - \int_0^{\bar{x}_0} D(x)}{\eta f'} \leq K', \\
& \quad \quad \frac{\int_{\bar{x}_{N'}}^{\bar{x}} D(x)}{\eta f''} \leq K'',
\end{aligned} \tag{54}$$

$$\begin{aligned}
& \max_{\{f^*, f^{**}, K^*, K^{**}, e, d, N, N^*\}} \Omega \cdot VC + \pi_{TP} + \pi_T \\
& \text{s. a} \quad \frac{\int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}_{N^*-1}} D(x)}{\eta f^*} \leq K^*, \\
& \quad \quad \frac{\int_{\bar{x}_{N^*-1}}^{\bar{x}} D(x)}{\eta f^{**}} \leq K^{**}.
\end{aligned} \tag{55}$$

# Capítulo IV

## 4 ESTRUCTURA URBANA Y TRANSPORTE PÚBLICO

En este capítulo se estudian los efectos que el diseño del transporte público tiene sobre la estructura urbana, entendiéndose por ésta el comportamiento respecto de la distancia al CBD del precio de renta de las viviendas y terrenos, densidad poblacional y estructural (proxy de la altura de las construcciones) y tamaño de las viviendas.

Basso et al (2018) estudian de manera teórica el efecto que el transporte público tiene en la estructura urbana. Ellos realizan la diferenciación total de la ecuación (6) con respecto a la distancia al CBD  $x$ :

$$\frac{\partial v}{\partial c} \left( -q \frac{\partial p}{\partial x} - p \frac{\partial q}{\partial x} - \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) + \frac{\partial v}{\partial q} \frac{\partial q}{\partial x} = 0, \quad (56)$$

de lo cual desprenden, utilizando la ecuación (5), lo que en palabras de Duranton and Puga (2015) se conoce como la condición Alonso-Muth:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{1}{q} \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad (57)$$

la cual refleja el “trade-off” entre precios y accesibilidad, dicho de otra manera, muestra que el precio de renta de las viviendas se mueve de manera contraria a como lo hace el costo generalizado de viajar a diario al CBD. Como los residentes que caminan hacia una estación aguas abajo enfrentan un costo generalizado decreciente con la distancia, mientras que los que caminan hacia una estación aguas arriba enfrentan un costo generalizado creciente con la distancia, el precio de renta de las viviendas en torno a las estaciones de transporte público es más elevado, mientras que entre éstas es menor (ver Figura 2.4).

Al diferenciar la ecuación (5) y reordenar los términos se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} \left[ \frac{\partial \left( \frac{\partial U / \partial q}{\partial U / \partial c} \right)}{\partial q} \right]^{-1}, \quad (58)$$

en donde el inverso del término en paréntesis es la pendiente de la curva de indiferencia, por lo tanto, siempre tiene signo negativo ya que la función de utilidad de los individuos es estrictamente cuasi-cóncava. Por lo anterior, se tiene que el tamaño de vivienda cambia de manera opuesta a como lo hace el precio de renta de la vivienda ante cambios en la distancia al CBD, es decir, mientras más cerca de una estación de transporte público se localice una vivienda menor será su tamaño (ver Figura 2.4).

Al diferenciar la condición de beneficio nulo de los desarrolladores inmobiliarios (ecuación 10) con respecto a la distancia al CBD y utilizar la condición de optimalidad de la maximización de beneficio (ver ecuación (9)) de los desarrolladores inmobiliarios, se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} h(S), \quad (59)$$

de lo cual se desprende que el valor del suelo se comporta de la misma manera que el precio de renta de las viviendas, es decir, el suelo más cercano a las estaciones tiene mayor valor (ver Figura 2.5). Por otra parte, al diferenciar la ecuación (24) con respecto a  $x$  se obtiene:

$$\frac{\partial S}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x} \frac{h(S)}{p h''(S)}. \quad (60)$$

Como  $h''(S)$  es negativo debido a que el capital adicional usado sobre una cierta cantidad de suelo es cada vez menos productivo, la densidad estructural, la cual es una medida de la altura de las construcciones, se comporta de la misma manera que el precio ante cambios en la distancia al CBD (ver Figura 2.5). Finalmente, al diferenciar la función densidad poblacional con respecto a la distancia al CBD se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{\partial D}{\partial x} = \frac{h'(S) \frac{\partial S}{\partial x} q - h(S) \frac{\partial q}{\partial x}}{q^2}. \quad (61)$$

Como  $\frac{\partial S}{\partial x}$  tiene el mismo signo que  $\frac{\partial p}{\partial x}$ , mientras que  $\frac{\partial q}{\partial x}$  tiene el signo contrario a éste, se concluye que la densidad poblacional cambia de la misma forma que como cambia el precio de renta de las viviendas con respecto a  $x$ , es decir, la densidad es mayor en la medida que se está más cerca de las estaciones de metro.

Basso et al (2018) muestran de manera teórica como cambian los patrones de la ciudad monocéntrica clásica al introducir estaciones de transporte público a las cuales se puede acceder

caminando, sin embargo, no estudian el efecto de todas las variables de diseño o estructura de líneas del transporte público.

A partir de ahora, se estudia en detalle el efecto que el diseño del sistema de transporte público tiene sobre la estructura urbana a través de simulaciones numéricas. La estrategia utilizada para estudiar el efecto de las distintas características del sistema de transporte público es a través de estáticas comparativas, es decir, el cambio exógeno de una cierta característica, ceteris paribus el resto de ellas. Para lo anterior siempre se considera un escenario base común sobre el cual se realiza una única modificación a través de una variable de diseño del sistema de transporte público. Por variable de diseño se entiende: tarifa, frecuencia, estructura espacial de las detenciones a lo largo de la ciudad, tamaño de vehículo y estructura de líneas. Sin embargo, cabe mencionar que como no se considera hacinamiento al interior de los vehículos de transporte en la modelación, el tamaño de éstos no incide en el costo generalizado de viaje y por lo tanto tampoco tiene un efecto sobre la estructura urbana ni es objeto de estudio en el presente capítulo.

Los parámetros de las simulaciones numéricas realizadas se presentan a continuación:

Tabla 4.1: Parámetros utilizados en las simulaciones numéricas.

Parámetro	Descripción	Valor
$\mu$	Velocidad de caminata	4 km/h
$v$	Velocidad cruceo bus	50 km/h
$I$	Ingreso	77.35 US\$
$r_A$	Renta agrícola	4,000 US\$
$\Omega$	Población	10,000
$w$	Tasa Salarial	17.19 US\$
$t_s$	Tiempo de subida	2,5 s
$t_b$	Tiempo de bajada	1,42 s
$t_{tr}$	Penalidad temporal por transbordo	5 min
$\eta$	Cantidad de periodos	5
$\alpha$	Porcentaje del ingreso gastado en vivienda	0.3
$\beta$	Poder de la función de producción	0.6
$c_{10}$	Costo de capital y personal fijo respecto del tamaño o capacidad del bus	32.66 US\$/(bus-h)
$c_{11}$	Costo de capital y personal variable respecto del tamaño o capacidad del bus	0.15 US\$/(pax-h)
$c_{20}$	Costo de operación fijo respecto del tamaño o capacidad del bus	0.58 US\$/(bus-km)
$c_{21}$	Costo de capital y personal variable respecto del tamaño o capacidad del bus	0.0067 US\$/(pax-km)
$t_{dac}$	Penalidad temporal por aceleración y desaceleración	7.95 s

Es importante destacar que, si bien el modelo soporta cualquier tecnología de transporte público masivo, los parámetros usados en las simulaciones numéricas son consistentes con un sistema BRT. Para una explicación del valor de cada uno de ellos se recomienda revisar el Apéndice B. Además, se debe mencionar que la función de utilidad de los residentes de la ciudad se supone del tipo Cobb-Douglas con valores de parámetros que se explican en el Apéndice B y desarrollo algebraico respectivo para obtener expresiones analíticas de las variables que describen la estructura urbana desarrollado en el Apéndice A.

El escenario base en cuanto a lo que variables de diseño del sistema de transporte público respecta, a menos que se diga lo contrario, consta de una única línea de transporte público con un corredor de 12 kms de longitud y estaciones equidistantes entre sí ubicadas a 0.5 km de distancia (24 estaciones), una frecuencia de 30 veh/h y una tarifa de US\$2. Cuando exógenamente se cambia a una línea con transbordo o líneas exclusivas se asume que la frecuencia es la misma para todas las líneas, además se debe tener presente que en toda la investigación no se estudian tarifas diferenciadas, es decir, existe una única tarifa que se cobra por ingresar al sistema de transporte.

Cabe aclarar y recalcar que, en ningún caso, en este capítulo, existe una optimización detrás de los distintos escenarios presentados, ni se estudia el comportamiento del bienestar social. Dichos análisis se encuentran reservados para el siguiente capítulo, en donde se busca el diseño óptimo a través de la maximización del bienestar social.

En las subsecciones posteriores se presentan los resultados de los diferentes escenarios de simulación. En primer lugar, se estudian los efectos sobre la estructura urbana de un cambio exógeno de la frecuencia y tarifa del sistema de transporte público, luego se estudia acabadamente la estructura espacial de las detenciones, para lo cual es necesario modificar la cantidad de estaciones y el espaciamiento entre ellas, a posterior se estudia el efecto de la modificación de la estructura de líneas a través de las líneas con transbordo y exclusivas y finalmente se estudia la capacidad del modelo para capturar el fenómeno de suburbios desconectados y las condiciones que los propician.

## **4.1 Frecuencia**

La frecuencia con la que opera el sistema de transporte público afecta el costo de viaje de casi todos los residentes de la ciudad, salvo aquellos que caminan al CBD. El principal efecto de una modificación en la frecuencia del sistema es la variación del tiempo de espera de los usuarios, sin embargo, como este modelo permite la relocalización y con ello una demanda que reacciona al nivel de servicio del sistema de transporte, además existe un cambio en el tiempo de viaje en vehículo de aquellos individuos que se relocalizan, junto con una modificación del límite urbano, y un cambio en las externalidades de carga y descarga dado por el cambio en la partición modal.

En concreto una mejora de la frecuencia del sistema de transporte público rota las curvas de estructura urbana ya que el tiempo de desplazamiento para llegar al centro mejora a través de los menores tiempos de espera y en consecuencia la población tiene incentivos a relocarse en zonas alejadas del CBD, en donde, el precio de renta es menor y las viviendas son más grandes. Cabe mencionar que cuando el cambio de frecuencia del sistema no se traduce en una modificación importante del tiempo de viaje de los usuarios los efectos sobre las características urbanas se atenúan e incluso se pueden volver casi inexistentes.

Una mejora sustancial en el nivel de servicio del transporte público vía frecuencia disminuye el precio de renta de viviendas y terrenos que se encuentran cerca del CBD y lo eleva en las zonas suburbanas, lo cual muestra lo atractivo que se vuelven estos terrenos, de hecho, de las simulaciones numéricas se obtiene que el diferencial del precio de renta de las viviendas entre el CBD y el límite urbano es de un 70.8% en el caso de un sistema de transporte con una frecuencia de 12 veh/h, mientras que con 30 veh/h este es de un 59.8%, es decir, aumenta el valor de los suburbios relativo a las localizaciones del centro (ver Figura 4.1). Lo anterior también se refleja en el límite urbano el cual aumenta de 12.1 km a 12.4 km, dando cuenta de terrenos que antes se destinaban exclusivamente para fines agrícolas ahora se vuelven lo suficientemente atractivo para desarrollos urbanos.

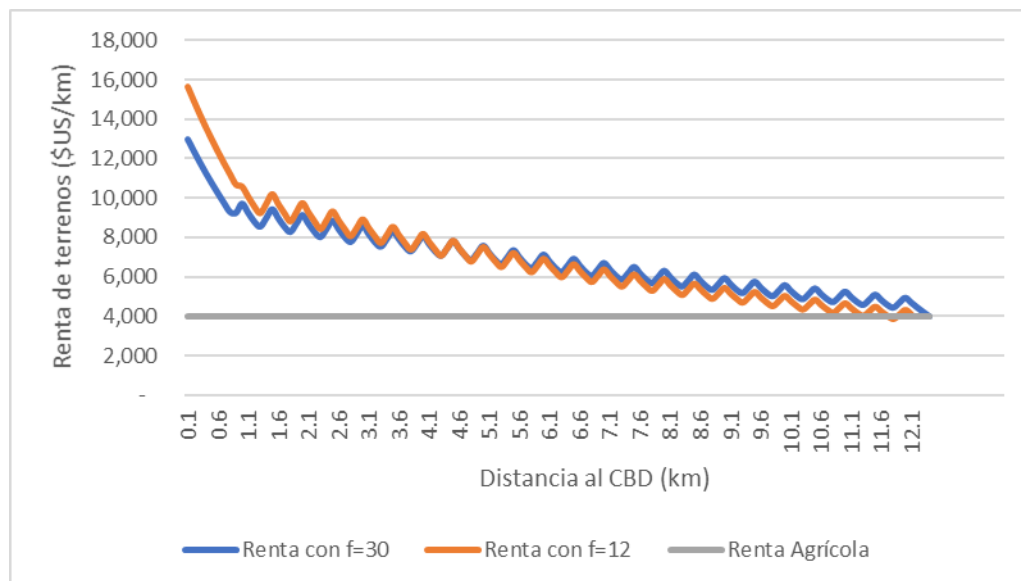


Figura 4.1: Precio de renta de terrenos para diferentes valores de frecuencia según distancia al CBD.



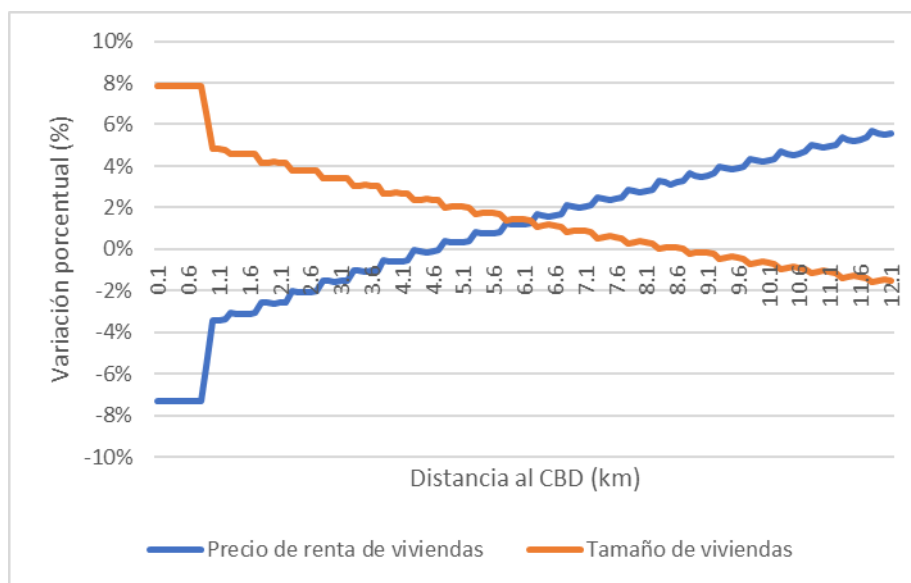


Figura 4.2: Variación porcentual en el precio de renta y tamaño de las viviendas ante un cambio en la frecuencia de 12 veh/h a 30 veh/h según distancia al CBD.

De las simulaciones numéricas realizadas (ver Figura 4.2) se puede apreciar como un cambio en la frecuencia del sistema de 12 veh/h a 30 veh/h reduce el precio de renta de las viviendas en más de un 7% en las zonas cercanas al CBD y lo eleva en más de un 5% en las zonas suburbanas. La extensión del límite urbano, en conjunto con el precio de renta de las viviendas, explican el comportamiento del tamaño de éstas, el cual, según las simulaciones realizadas (ver Figura 4.2), aumenta en gran parte de la ciudad, con aumentos por sobre el 7% en las cercanías del CBD y de más de un 3% en los primeros 3.7 kms, y disminuye aproximadamente a partir del noveno kilómetro con disminuciones no superiores a un 2%. El menor precio de renta de las viviendas incentiva la adquisición de un mayor espacio para residir, por lo cual el aumento del precio en los suburbios explica la disminución del tamaño en estas zonas, aunque este último efecto es suavizado debido al aumento del límite urbano, el cual provee un mayor espacio para localizar la misma cantidad de personas.

En términos de densidad, ante aumentos en la frecuencia del sistema, los suburbios se vuelven relativamente más densos, tanto poblacional como estructuralmente, en comparación con las localizaciones cercanas al centro. Esto implica que una ciudad con un sistema de transporte con altos niveles de frecuencia posea suburbios con construcciones más altas y más poblados. De las simulaciones numéricas realizadas se puede observar cómo pasar de 12 veh/h a 30 veh/h en el sistema de transporte trae consigo una disminución de más de un 15% en la cantidad de residentes que habitan el primer kilómetro de la ciudad. Esta variación va disminuyendo por cada kilómetro más lejano al CBD hasta que aproximadamente en la mitad de la ciudad se puede apreciar un cambio en la tendencia, lo que da cuenta del aumento en la cantidad de habitantes de los suburbios con aumentos de más de un 5% en los últimos kilómetros de la ciudad.

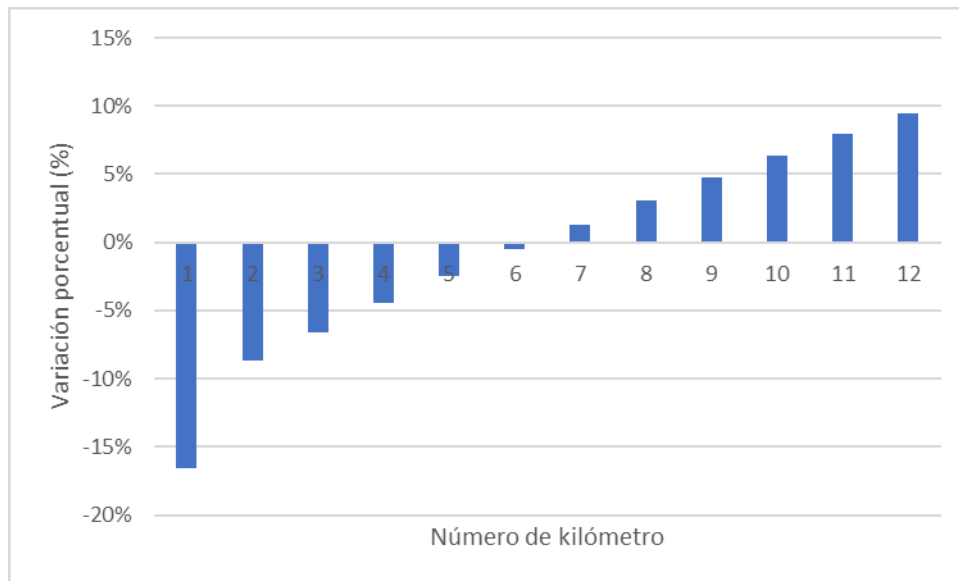


Figura 4.3: Variación del número de habitantes por kilómetro al modificar la frecuencia del sistema de transporte público de 12 veh/h a 30 veh/h.

En resumen, un sistema de transporte público con una frecuencia significativamente mayor eleva las rentas de las zonas suburbanas y disminuye la de las localizaciones cercanas al centro, es decir, los suburbios se vuelven relativamente más atractivos para la localización residencial, extiende el límite urbano y disminuye la densidad tanto poblacional como estructural del centro de la ciudad.

## 4.2 Tarifa

La tarifa que se cobra por acceder al sistema de transporte público tiene más de un efecto en el costo generalizado de viaje de los usuarios del sistema, por un lado, se tiene un efecto directo dado por el costo pecuniario, mientras que, por otro lado, se tienen efectos indirectos dados por la relocalización de los residentes y el cambio en la partición modal de transporte público, lo que se traduce en una variación de los tiempos de viaje de los usuarios.

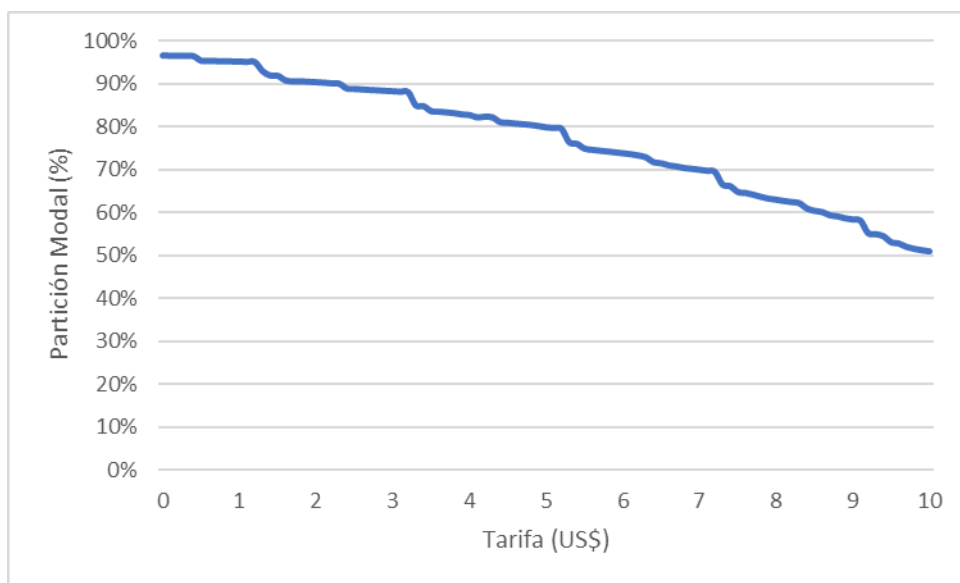


Figura 4.4: Partición modal del Transporte Público para diferentes niveles tarifarios.

La tarifa que se cobra por acceder al sistema de transporte público afecta directamente la cantidad de usuarios de éste. Ante aumentos de la tarifa existe un incentivo para que aquellos residentes que viven relativamente cerca del CBD prefieran el modo caminata. A partir de simulaciones numéricas (ver Figura 4.4) se puede apreciar como un aumento de la tarifa cambia la partición modal de la ciudad, en el caso en que esta es nula casi la totalidad de la ciudad usa transporte público, mientras que cuando esta se encuentra en torno a los US\$10 sólo el 51% de la ciudad son usuarios de transporte público.

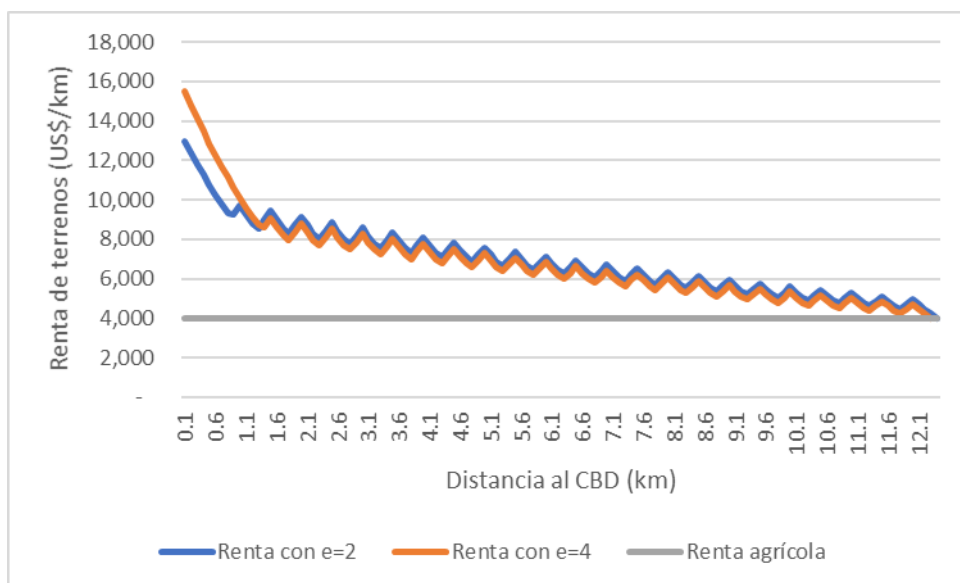


Figura 4.5: Precio de renta de los terrenos para diferentes tarifas según distancia al CBD.

Al igual que como ocurre con la frecuencia un cambio en la tarifa del sistema de transporte público genera un efecto rotación en todas las curvas que describen la estructura urbana. Un aumento

significativo de ésta tiende a comprimir la ciudad ya que hay un mayor incentivo para relocalizarse en las cercanías del CBD y no usar el transporte público. De esta manera el precio de renta de viviendas y terrenos se eleva en las localizaciones cercanas al centro y disminuye a lo largo de la ciudad, al igual como ocurre en términos de densidad poblacional y estructural.

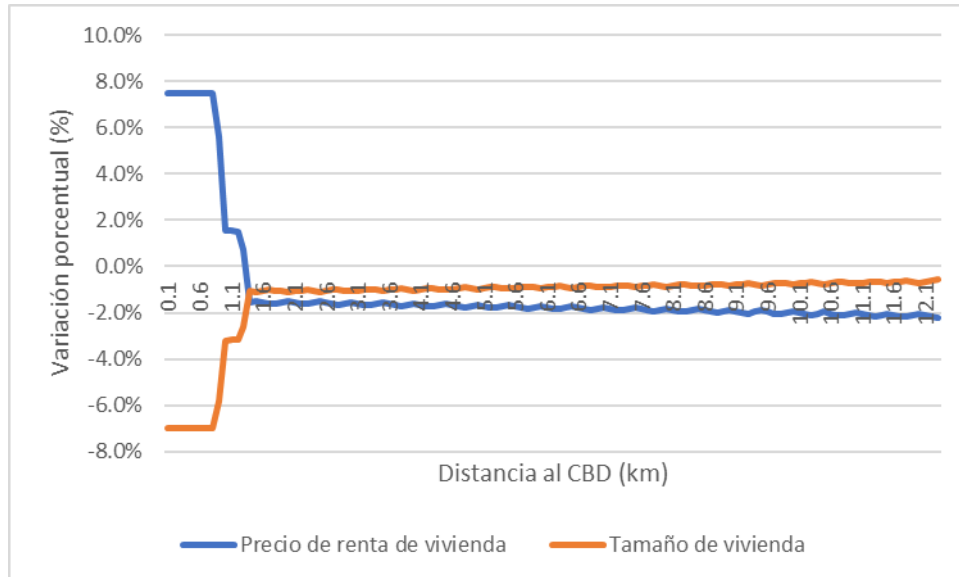


Figura 4.6: Diferencial del precio de renta y tamaño de las viviendas ante un aumento en la tarifa de US\$2 a US\$4 según distancia al CBD.

En particular, tal como se puede apreciar en la Figura 4.6, el precio de renta de las viviendas en el centro de la ciudad, al pasar de una tarifa de US\$2 a US\$4, aumenta en más de un 7%, aunque al recorrer la ciudad rápidamente se puede apreciar la tendencia predominante a lo largo de esta. A partir de una distancia de 1.4 km del CBD la variación del precio es negativa y comienza a decrecer con una leve tendencia a la baja.

Un sistema de transporte público encarecido provoca que la ciudad se encoja y con ello el tamaño de las viviendas. Como se puede apreciar en la Figura 4.6 al pasar de una tarifa de US\$2 a US\$4, a lo largo de toda la ciudad, el tamaño de las viviendas disminuye, lo cual responde al mayor precio de renta de estas y el menor espacio disponible para viviendas urbanas en la ciudad.

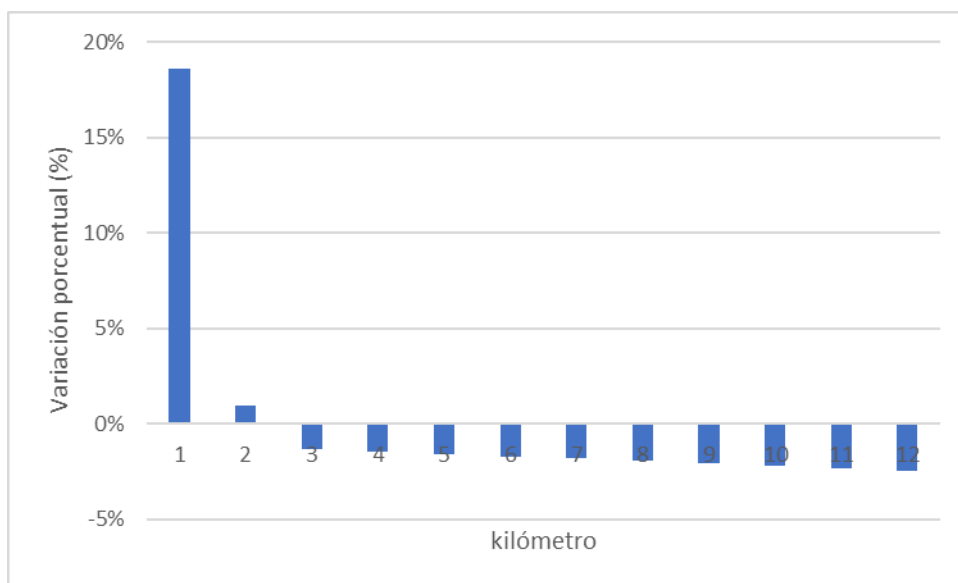


Figura 4.7: Variación en la cantidad de habitantes por kilómetro ante un aumento en la tarifa de US\$2 a US\$4.

Finalmente, en la Figura 4.7 se puede apreciar el cambio en la cantidad de habitantes por cada kilómetro de ciudad al pasar de US\$2 a US\$4, de lo cual se confirma todo lo anteriormente mencionado, los individuos prefieren localizarse en las zonas cercanas al CBD de forma tal de no usar el sistema de transporte público. En este caso, la principal variación se da en el primer kilómetro de ciudad en donde la cantidad de habitantes aumenta en un 18.6%, mientras que a lo largo de la mayor parte de la ciudad se puede apreciar una leve disminución en la cantidad de habitantes por kilómetro.

### 4.3 Estructura y longitud del corredor de transporte público

Como se menciona al inicio del capítulo, los parámetros de las simulaciones numéricas son consistentes con un sistema BRT, es por ello que, al estudiar la estructura espacial de las detenciones del sistema se entiende que éstas se enmarcan dentro de un corredor de transporte público, en la figura de estaciones o paradas las cuales poseen una respectiva infraestructura en conjunto con el corredor.

El largo del corredor de transporte público tiene una incidencia directa sobre la estructura urbana. Un corredor de mayor longitud extiende el límite urbano, con lo cual disminuye la densidad poblacional de las zonas cercanas al CBD y vuelve más atractivo los suburbios. En esta modelación, existen dos variables de diseño de transporte público que dan forma al corredor y definen la longitud de éste, las cuales son el espaciamiento entre estaciones y la cantidad de éstas. Si bien aumentando tanto el espaciamiento entre estaciones como la cantidad de éstas, ceteris paribus, puede aumentar la longitud del corredor, ambas variables inciden de manera diferente en

el costo de viaje y en la estructura urbana. Cabe mencionar que en todo el análisis realizado en esta subsección el espaciamiento entre estaciones se considera invariante con la distancia al CBD.

Para una longitud de corredor dada, un mayor espaciamiento entre estaciones aumenta el costo de viaje de los usuarios del sistema de transporte a través de mayores tiempos de acceso, pero a la vez disminuye el tiempo de viaje en vehículo por las menores detenciones que se hacen a lo largo del corredor, las cuales aminoran la penalidad temporal por detenciones dada por la aceleración y desaceleración de los vehículos de transporte público. Cabe mencionar que, para una longitud de corredor dada, aumentar el espaciamiento es equivalente a disminuir el número de estaciones.

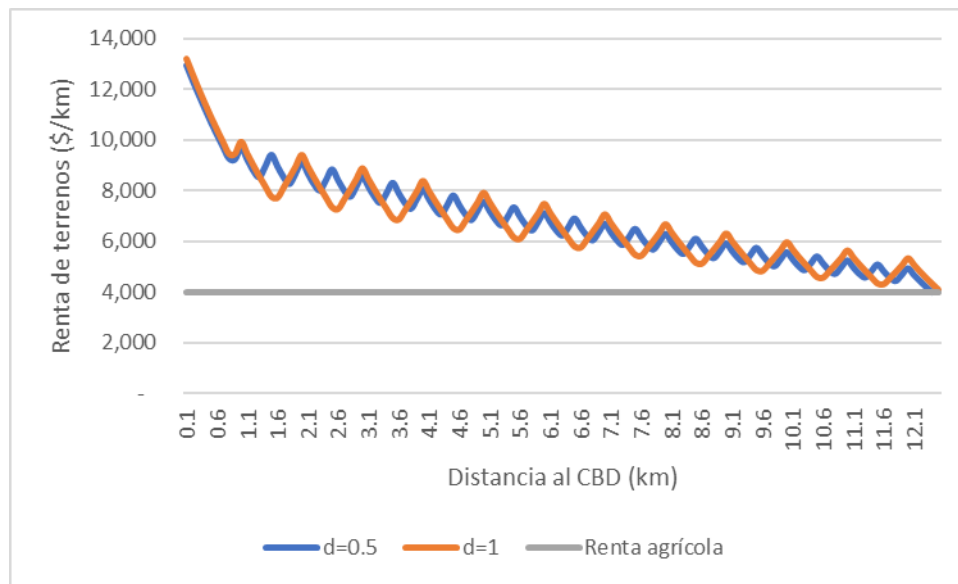


Figura 4.8: Renta de los terrenos urbanos con un corredor de 12 km de longitud para un espaciamiento entre estaciones de 0.5 km y 1 km.

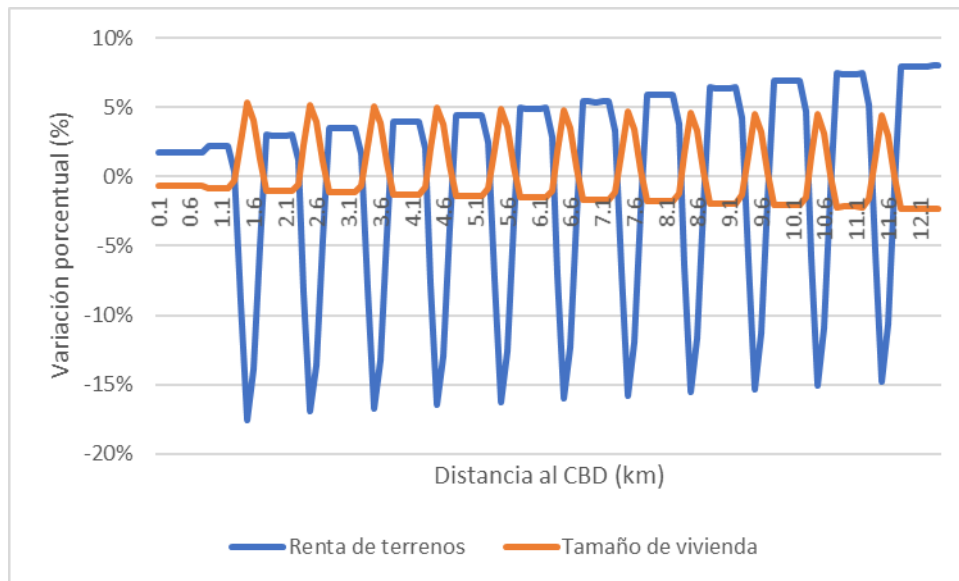


Figura 4.9: Variación porcentual de la renta urbana y el tamaño de viviendas al pasar de un espaciamiento entre estaciones de 0.5 km a 1 km.

La variación del espaciamiento entre estaciones para una longitud de corredor constante no tiene un efecto suburbanizador, pero si cambia la estructura interna de la ciudad. En base a las simulaciones realizadas, la variación del espaciamiento de 0.5 km a 1 km, para una longitud de corredor de 12 km, extiende levemente el límite urbano de 12.4 km a 12.5 km con una migración de población a terrenos que previo a la variación eran destinados a uso agrícola de tan sólo un 0.5% de la población total de la ciudad. Sin embargo, es posible apreciar el cambio interno de la ciudad (ver Figura 4.10) ya que modificar el espaciamiento de 0.5 km a 1 km se disminuye la población en las zonas en donde previamente existía una estación. En línea con lo anterior, en la Figura 4.8 y Figura 4.9 se puede apreciar el efecto sobre las rentas de aumentar el espaciamiento manteniendo constante la longitud del corredor. En los dos escenarios simulados el corredor tiene una longitud de 12 km de largo, sin embargo, se puede apreciar como el mayor espaciamiento entre estaciones genera rentas más altas en torno a estas y mucho más baja entre ellas, lo cual responde directamente al aumento del tiempo de acceso a las estaciones y el consecuente menor atractivo de estos terrenos para vivir. De esta manera (ver Figura 4.9) al comparar la localización a 1.5 kilómetros del CBD, de un primer escenario con espaciamiento entre estaciones de 0.5 km con la misma localización, pero del escenario en que el espaciamiento es de un kilómetro, es posible apreciar que el precio de renta es inferior en más de un 15%. Lo mismo ocurre para las localizaciones que se encuentran a una distancia en kilómetros del CBD de 2.5, 3.5, 4.5 y así sucesivamente. Por otra parte, como ya se ha visto anteriormente, el tamaño de las viviendas tiene un comportamiento completamente contrario al precio de renta de renta de las viviendas y terrenos (ver Figura 4.9), en la cercanías de las estaciones, cuando el espaciamiento es mayor, el tamaño de las viviendas es menor, mientras que en las localizaciones que se encuentran a una distancia en kilómetros del CBD de 1.5, 2.5, 3.5 y así sucesivamente, el tamaño de viviendas, en el escenario con espaciamientos de un kilómetro, es alrededor de un 5% superior.

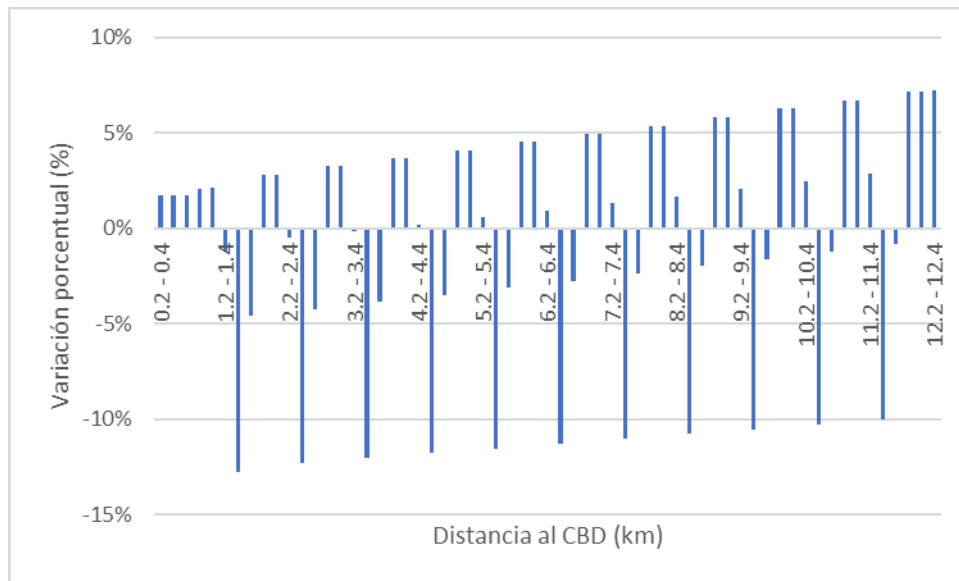


Figura 4.10: Variación porcentual en la cantidad de habitantes cada 200 metros al pasar de un espaciamiento entre estaciones de 0.5 km a 1 km.

Aumentar la longitud del corredor a través del número de estaciones, manteniendo el espaciamiento constante, extiende el límite urbano, disminuye la densidad de la ciudad en las cercanías del centro y la aumenta en los suburbios. A partir de las simulaciones numéricas realizadas, en las cuales se considera un espaciamiento entre estaciones de un kilómetro, se obtiene que pasar de 12 a 15 estaciones de transporte público extiende el límite urbano de 12.5 km a 15.1 km (ver Figura 4.11), lo cual da cuenta de lo atractivo que se vuelve el suelo de los suburbios ya que terrenos que previo a la existencia de dichas estaciones eran destinados al uso agrícola ahora se vuelven urbanos. En la Figura 4.11 se puede apreciar como a lo largo de toda la extensión de la ciudad con un mayor número de estaciones la renta de los terrenos es menor, lo cual también se cumple para el caso de las rentas de las viviendas en donde la disminución del precio está en torno al 2.5%, mismo porcentaje de aumento del tamaño de las viviendas. Esto último se debe a que menos personas quieren residir en los primeros kilómetros de la ciudad, con lo cual, existe más espacio para un menor número de personas, es decir menor densidad tanto poblacional como estructural. En línea con lo anterior, de las simulaciones se obtiene que un 7.18% de la población de la ciudad se relocaliza más allá de los 12.5 km (límite urbano con 12 estaciones), al aumentar el número de estaciones, lo cual da cuenta del poder suburbanizador del aumento de la longitud del corredor.



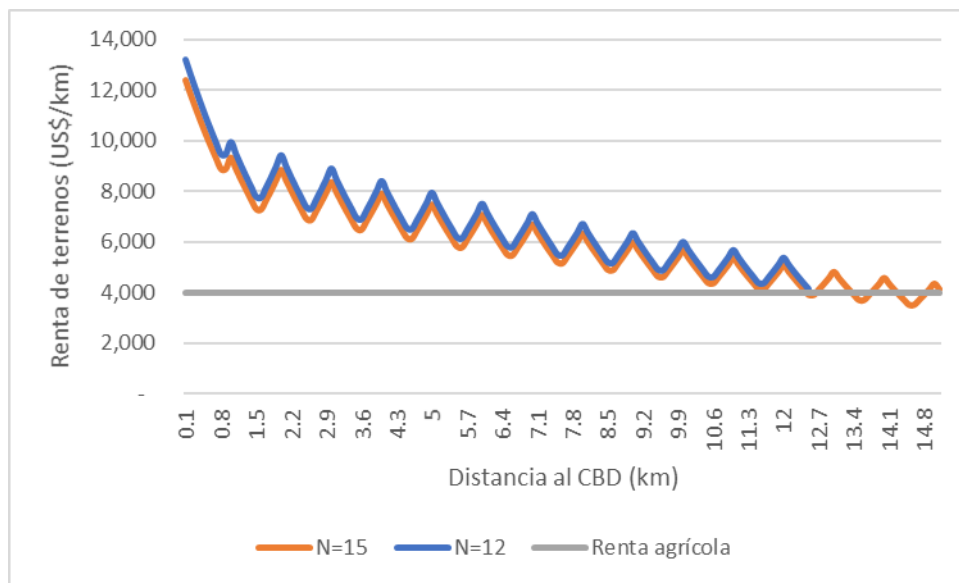


Figura 4.11: Renta de terrenos según distancia al CBD con 15 y 12 estaciones de transporte público.

#### 4.4 Línea con transbordo

En esta subsección se estudia el cambio exógeno de pasar de una estructura de línea única a una línea con transbordo. Respecto del caso base, cabe mencionar que la tarifa por ingresar al sistema es la misma (US\$2) independiente de si se realiza un transbordo o no, la frecuencia es la misma tanto para la línea que sirve los suburbios como la línea que sirve la zona más cercana al CBD y la estación de transbordo se encuentra en la mitad del corredor.

La introducción de una estación de transbordo en el sistema de transporte público induce un mayor costo generalizado de viaje para aquellos residentes que viven en las zonas suburbanas. Esto se debe a que el transbordo induce un tiempo de espera adicional, interrumpe el viaje de los usuarios de transporte público, lo cual se conoce como penalidad de transbordo y puede ser valorizada monetariamente, e impone un mayor tiempo de viaje en vehículo debido a una externalidad de descarga adicional. Por otra parte, pasar a una estructura de línea de este tipo modifica el patrón de localización de los residentes, aumentando la densidad poblacional hacia el centro de la ciudad, lo que trae consigo un menor tiempo de viaje para una considerable cantidad de residentes que ahora viven más cerca de sus puestos de trabajo. Cabe destacar que esto también puede imponer un tiempo de viaje adicional sobre quienes viven en los suburbios.

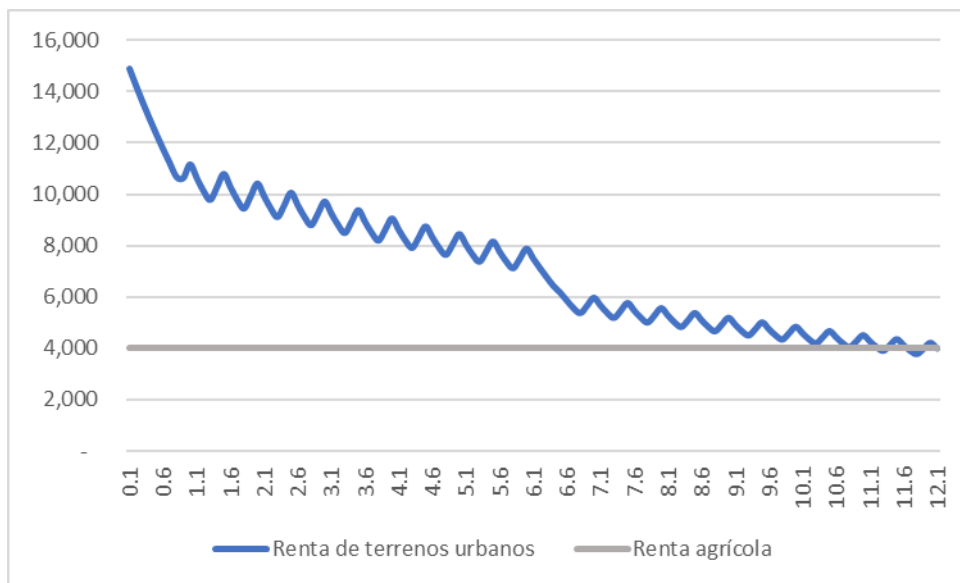


Figura 4.12: Precio de renta de los terrenos ante la introducción de un sistema con transbordo.

De la Figura 4.12 se puede apreciar como introducir un sistema de líneas con transbordo (la estación de transbordo se encuentra en la mitad del corredor), produce un quiebre en la tendencia de las variables de estructura urbana. Este quiebre se produce porque transbordar vuelve menos atractivo vivir en las zonas suburbanas, razón por la cual la renta de las viviendas y terrenos de dichas zonas disminuye y la de las zonas cercanas al CBD se eleva. En base a las simulaciones numéricas realizadas la mera introducción de una estación de transbordo eleva en aproximadamente un 6% el precio de renta de las viviendas más cercanas al centro, diferencial que decrece con la distancia al CBD y tiene un punto de quiebre a partir de aquellas localizaciones en donde es necesario transbordar para llegar al CBD. En dichos casos el precio cae en más de un 4% con una caída aún más pronunciada en las cercanías del límite urbano.

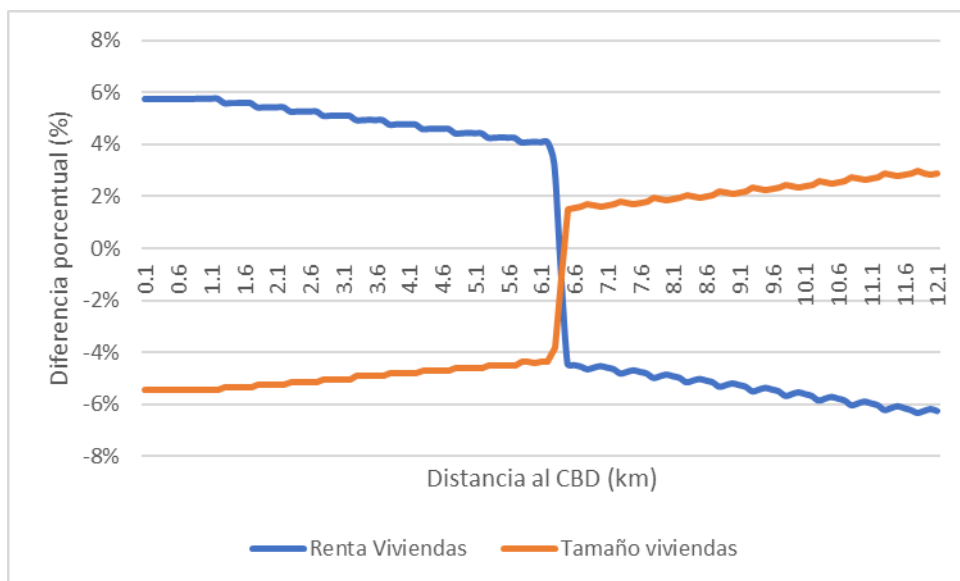


Figura 4.13: Variación en el precio de renta y tamaño de las viviendas al introducir un sistema de línea con transbordo.

Un sistema de transporte público con transbordo vuelve más densa la ciudad en aquellas zonas en donde no es necesario transbordar para llegar a los puestos de trabajo. Esto se traduce en suburbios con menor población viviendo en estructuras de menor altura y viviendas de mayor tamaño (ver Figura 4.13 y Figura 4.14). Lo anterior también repercute en el límite urbano, según las simulaciones realizadas, la sola introducción de la estación de transbordo disminuye en 0.3 km el límite urbano. En la Figura 4.14 se puede apreciar como en los primeros kilómetros hay una diferencia de más de un 1% de la población total cuando se impone un transbordo a las zonas más alejadas del CBD, mientras que hacia el final de la ciudad el decrecimiento poblacional por kilómetro puede llegar a más de un 3% de la población total.

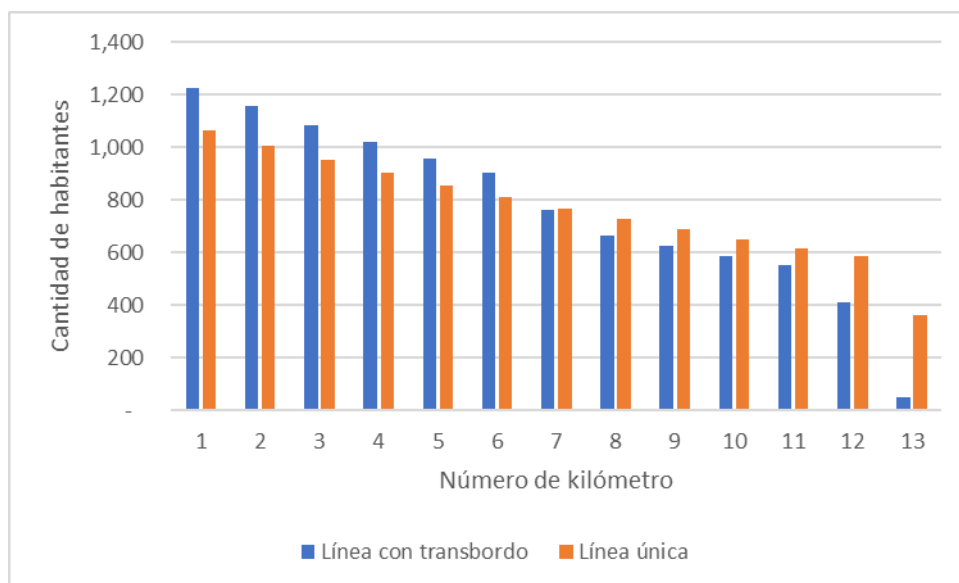


Figura 4.14: Cantidad de habitantes por kilómetro con y sin líneas con transbordo.

La sola imposición de un esquema de transporte en que el transbordo es necesario para llegar al CBD en las zonas suburbanas disminuye el valor de los terrenos de estas zonas al punto de que dejan de ser atractivas para desarrollos inmobiliarios. Como las zonas cercanas al CBD son mucho más atractivas relativamente a los suburbios la demanda habitacional, en estas zonas, aumenta, elevando el precio de renta y disminuyendo el tamaño de las viviendas.

## 4.5 Líneas exclusivas

En esta subsección se estudia el cambio exógeno de pasar de una estructura de línea única a un sistema con líneas exclusivas. Respecto del caso base, cabe mencionar que la tarifa por ingresar al sistema es la misma (US\$2), independiente de la línea de transporte en la que se viaje, la frecuencia es la misma tanto para la línea que sirve los suburbios como la línea que sirve la zona más cercana al CBD y la mitad del corredor es servido por una de las líneas y la otra mitad por la otra.

La ventaja de la exclusividad por zonas de las líneas de transporte radica en que zonas alejadas del CBD pueden ser servidas con un menor tiempo de viaje subyacente. Esto radica principalmente en que se reducen las externalidades negativas impuestas por los mismos usuarios del sistema, es decir, menores tiempos de subida y bajada.

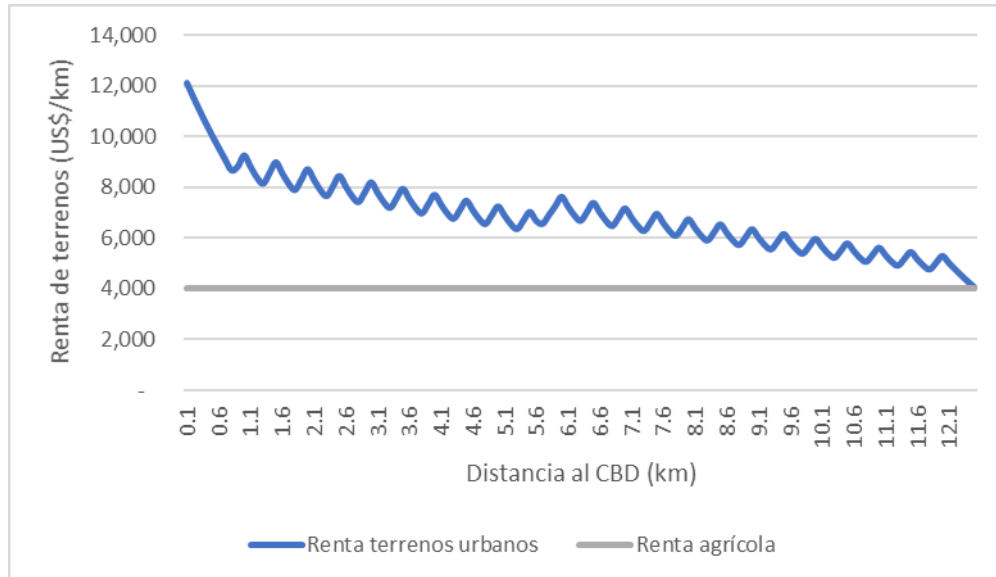


Figura 4.15: Precio de renta de terrenos al introducir un sistema de transporte público con líneas exclusivas.

La estructura de líneas exclusivas (cada mitad del corredor tiene su propia línea de transporte) del sistema de transporte público produce un quiebre en la tendencia de las variables de estructura urbana (ver Figura 4.15). Las zonas suburbanas se vuelven más atractivas para los residentes, razón por la cual se observa un aumento en el precio de renta de viviendas y terrenos (ver Figura 4.16), junto con el aumento de la densidad poblacional y estructural de esta zona de la ciudad. Como vivir lejos del CBD es más atractivo el límite urbano se extiende.

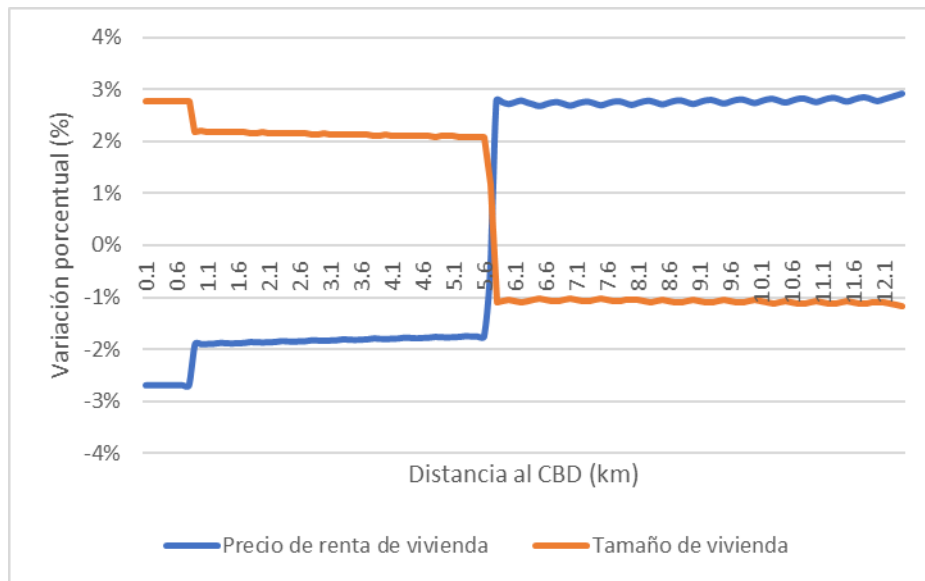


Figura 4.16: Variación en el precio de renta y tamaño de las viviendas al introducir un sistema con líneas exclusivas.

De las simulaciones numéricas se desprende que el precio de renta de las viviendas cae entre un 1.75% a un 2.7% en las zonas más cercanas al CBD y crece en más de un 2.7% en la zona suburbana, mientras que en el caso del tamaño de las viviendas se comporta de manera inversa con un aumento superior al 2% en el caso de la zonas más cercanas al CBD y una disminución superior al 1% en las zonas suburbanas. En cuanto a la cantidad de habitantes por kilómetro se aprecia (ver Figura 4.17) que de más de mil personas que vivían en el primer kilómetro sólo un poco más de novecientas lo hacen con la introducción de la exclusividad de líneas, lo cual se condice con la baja del precio de éstas que responde a la demanda residencial. La menor cantidad de habitantes por kilómetros con líneas exclusivas se mantiene hasta el sexto kilómetro de ciudad, punto desde donde comienza a servir otra línea de transporte, la cual induce un aumento en la cantidad de habitantes por kilómetro de más de un 5%.

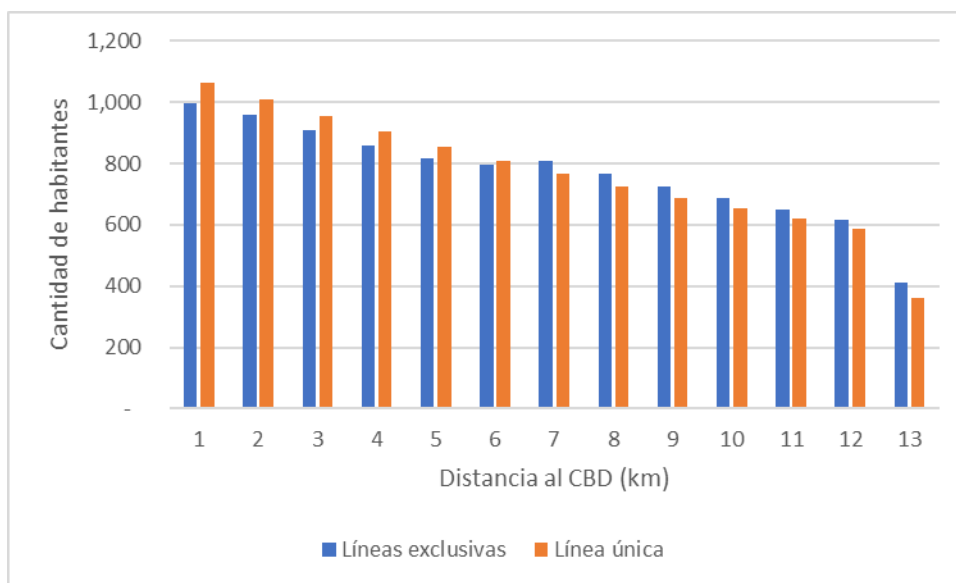


Figura 4.17: Cantidad de habitantes por kilómetro con y sin líneas exclusivas.

En resumen, la mejora sustancial de los tiempos de viaje en las zonas suburbanas provoca que estas se vuelvan mucho más atractivas, aumentando la demanda residencial en este tipo de terrenos. Con esto la densidad tanto poblacional como estructural disminuye en las zonas más cercanas al CBD, el límite urbano se extiende y se obtiene una ciudad con un mayor tamaño de vivienda.

## 4.6 Suburbios desconectados

Los suburbios desconectados son terrenos localizados cerca del límite de la ciudad que se encuentran separados de otros terrenos urbanos, cercanos al CBD, por terrenos no destinados al uso urbano, los cuales, en el caso de esta modelación, se entienden como de uso agrícola. En los modelos monocéntricos clásicos de economía urbana, como los patrones de las variables que describen la estructura urbana son monotónicos con la distancia al CBD (ver Figura 2.1), no existe la posibilidad de modelar suburbios desconectados, sin embargo, como con la inclusión de paraderos se rompe el patrón monotónico de las variables de estructura urbana (ver Figura 4.18), este enfoque de modelación permite capturar dicho fenómeno urbano.

Cuando no se incluyen paraderos la renta de los terrenos se ve como la ilustrada en la Figura 2.1, es decir, ésta sólo decrece en la medida que la distancia al CBD aumenta. Como el límite urbano se encuentra en el punto en que la renta de los terrenos urbanos deja de ser atractiva en comparación a la renta de los terrenos agrícolas y la curva de renta es estrictamente decreciente con la distancia al CBD no existe la posibilidad de que estas curvas se intersecten más de una vez, razón por la cual, en ningún caso existirá un suburbio desconectado. Sin embargo, al incluir estaciones de transporte público en la modelación, la renta de los terrenos se ve como la de la Figura 4.18, es decir, la no monotonía de la curva de precios permite la posibilidad de que haya más de una intersección entre la curva de renta de los terrenos urbanos y agrícolas. Como la curva de renta de

los terrenos luego de cruzarse por primera vez con la curva de renta agrícola vuelve a crecer con la distancia al CBD debido a la existencia de una estación de transporte público, se produce un suburbio desconectado. Dicho de otra manera, una estación de transporte público puede volver tan atractivos los terrenos colindantes a ella, debido a la mejora en la accesibilidad a la zona céntrica de la ciudad, que incentiva el desarrollo de nuevos proyectos inmobiliarios en terrenos que no necesariamente limitan con otros terrenos urbanos, es decir, se encuentran desconectados de la ciudad y sin la existencia de una estación o parada serían destinados a uso agrícola. De esta manera, la estructura del corredor del sistema de transporte público, y en particular, la localización de estaciones en los suburbios, es la principal variable de diseño que incide en la formación de suburbios desconectados.

En la sección 4.3 se muestran los resultados de extender la longitud de un corredor, con estaciones a un kilómetro de distancia entre sí, a través de la cantidad de estaciones. En base a las simulaciones mostradas (ver Figura 4.11) aumentar la cantidad de estaciones de 12 a 15 induce la formación de tres nuevos suburbios desconectados en los cuales se concentra el 6.42% de la población total. El primero de estos se encuentra a 200 metros del resto de los terrenos, tiene una longitud de 600 metros, los cuales se extienden entre los kilómetros 12.7 y 13.3 y concentra un 3.26% de la población total, el segundo se encuentra a 500 metros del primero, tiene una longitud de 400 metros y concentra el 2.12% de la población total, mientras que el último suburbio se encuentra a 700 metros del segundo suburbio y sólo tiene una longitud de 200 metros en los cuales concentra un poco más del 1% de la población de la ciudad. Si bien la frecuencia del sistema por sí sola no contribuye a la formación de suburbios desconectados, dada su existencia por la extensión de la longitud del corredor, un aumento significativo del nivel de frecuencia puede contribuir al aumento de población viviendo en este tipo de suburbios y a un aumento de la longitud de éstos, por ejemplo, aumentar la frecuencia del escenario anteriormente simulado de 30 veh/h a 60 veh/h modifica de un 6.42% de la población total a un 8.96%, la población que vive en suburbios desconectados, mientras que extiende la longitud de cada uno de los tres suburbios en 200 metros. Cabe mencionar que lo mismo puede ocurrir con una disminución significativa de la tarifa del sistema.

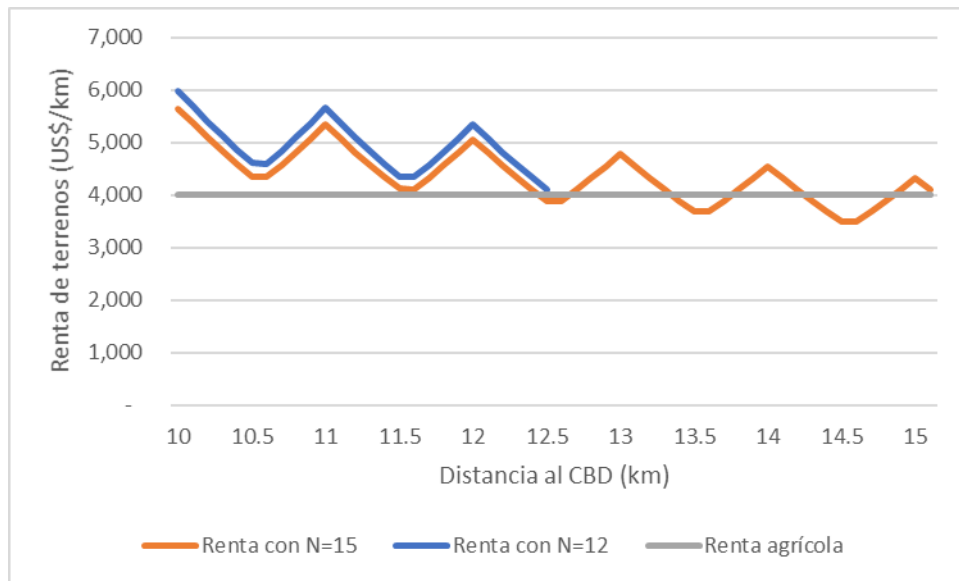


Figura 4.18: Renta de terrenos de los últimos kilómetros de la ciudad según distancia al CBD con 15 y 12 estaciones de transporte público.

Por un lado, aumentar el número de estaciones contribuye a la formación de suburbios desconectados, sin embargo, la interacción con el espaciamiento entre las estaciones también juega un rol relevante en su formación. Por ejemplo, al simular un corredor con un espaciamiento de 500 metros entre estaciones y 12 km de longitud, se encuentra que al comenzar a aumentar el número de estaciones, tal como se hizo anteriormente con un espaciamiento de un kilómetro, la ciudad sólo se extiende hasta el kilómetro 13.6 y se forma sólo un suburbio desconectado de 200 metros que concentra un poco más del 1% de la población total, es decir, sólo se pueden agregar tres nuevas estaciones ya que la cuarta estación no vuelve los terrenos lo suficientemente atractivo para desarrollos inmobiliarios. Esto se explica porque al estar las estaciones más cercas unas de otras los terrenos entre estaciones son más atractivos que aquellos cercanos a una estación adicional, es decir, existe un compromiso entre el tiempo de acceso y el mayor tiempo de viaje en vehículo que induce localizarse cerca de una estación más lejana al CBD. La idea principal es que una estación adicional puede atraer residentes en la medida que la ventaja en acceso de vivir cerca de ésta no se vea contrarrestada con el mayor tiempo de viaje en vehículo por estar más lejos del CBD.



# Capítulo V

## 5 DISEÑO ÓPTIMO DE TRANSPORTE PÚBLICO

En este capítulo se estudia en detalle el diseño del sistema de transporte público en términos del bienestar social logrado. El objetivo es obtener conclusiones concretas acerca de cuál es el diseño que mejora el bienestar de la sociedad, de forma tal de obtener conclusiones relevantes para la toma de decisión de planificadores y entes reguladores que se encargan de diseñar y/o planificar el sistema de transporte público de una ciudad, siendo la principal diferencia y aporte a la literatura considerar el efecto sobre la estructura urbana y la posibilidad de relocalización de los usuarios y/o residentes, dos características que de ignorarse pueden traer consecuencias inesperadas en la dinámica de la ciudad en el largo plazo.

Diseño óptimo del sistema de transporte público se entiende como la combinación de variables de diseño del sistema que son mejores para la sociedad, entendido esto último como la agregación de los beneficios netos de cada uno de los residentes, el valor generado en los terrenos y el beneficio neto de la operación del transporte público (ver sección 3.6). Las variables de diseño consideradas son frecuencia, tarifa, tamaño de vehículo y estructura del corredor, siendo este último modelado a través de la cantidad de estaciones y el espaciamiento entre éstas, además de las estructuras de líneas: única, con transbordo y exclusivas (ver sección 3.4).

La estrategia utilizada para llevar a cabo el objetivo del capítulo consiste en la maximización del bienestar (ver ecuaciones (53), (54) y (55)) para cada estructura de línea considerada y luego basta con comparar el máximo bienestar social obtenido en cada caso para conocer el diseño óptimo. A modo de tener un parámetro de comparación o referencia, el óptimo social obtenido en el escenario con una única línea de transporte se usa como caso base para comparar las demás estructuras de líneas tratadas. Todos los resultados mostrados en el presente capítulo corresponden a simulaciones numéricas cuyos parámetros son los presentados al inicio del capítulo anterior (ver Tabla 4.1), los cuales como ya se mencionó en capítulos anteriores son consistentes con un sistema BRT.

Cada sección del capítulo aborda una de las estructuras de línea anteriormente mencionadas. En cada una de éstas se maximiza el bienestar social en base a las variables de diseño y se realizan diferentes análisis de los cambios a nivel urbano que induce cada estructura en comparación con el caso base (diseño óptimo con una estructura de línea única). En particular, en el escenario base también se estudia la estructura espacial interna del corredor considerando que las estaciones pueden estar a diferente distancia unas de otras según la distancia al CBD (ver subsección 3.4.4).

## 5.1 Línea Única

En esta sección se estudian las variables de diseño del sistema de transporte público que maximizan el bienestar social sobre la base de que el sistema de transporte público posee solo una línea de transporte (ver sección 3.4). Inicialmente el análisis se hace en base a estaciones equidistantes entre sí, sin embargo, a lo largo de la sección este supuesto se relaja para poder estudiar la estructura espacial interna del corredor de transporte público.

### 5.1.1 Descripción General del Óptimo Social

El máximo bienestar social se alcanza (ver Tabla 5.1) cuando se tienen intervalos de pasada entre vehículos de transporte público de aproximadamente un minuto y 28 segundos, se cobra una tarifa de US\$1.9 por usar el servicio de transporte y los vehículos que circulan por el corredor tienen una capacidad para 46 pax/veh. La estructura de corredor óptima es aquella en que éste tiene una longitud de 10.8 km de largo con 18 estaciones espaciadas a 0.6 km de distancia unas de otras.

Tabla 5.1: Variables de diseño en el óptimo social con una estructura de línea única de transporte público.

$f$ (veh/h)	$d$ (km)	$e$ (US\$)	$K$ (pax/veh)	$N$
41	0.6	1.9	46	18

En el óptimo la partición modal de transporte público asciende al 93.38% de la población, donde quienes residen en los primeros 500 metros de ciudad prefieren caminar al CBD. Esto se relaciona directamente con lo apreciado en la Figura 5.1 en donde se observa que la afluencia de usuarios de la primera estación es menor que en la segunda aun cuando la densidad poblacional es mayor conforme menor es la distancia al CBD. A lo largo de la ciudad se aprecia la menor afluencia en las estaciones de transporte público, consecuencia directa de la menor densidad poblacional a mayor distancia del CBD, sin embargo, en la última estación (estación número 18) existe una concentración importante de residentes, que inclusive supera levemente la cantidad de residentes que sube en las estaciones más cercanas al CBD, esto se debe a que el límite urbano se encuentra en el kilómetro 11.5, mientras que el corredor óptimo sólo llega hasta el kilómetro 10.8. Cabe mencionar que los individuos que se localizan en el límite urbano deben caminar más de 10 minutos para llegar a una estación de transporte siendo de esta manera quienes más caminan en toda la ciudad, aunque a la vez los que pagan el menor precio de renta por sus viviendas. La razón de que sea óptimo socialmente no tener un sistema de transporte público masivo hasta el último tramo de la ciudad refleja que el beneficio generado para los residentes de los suburbios, lugar con la menor densidad poblacional de la ciudad, no es mayor que el costo de construir una estación adicional y extender el corredor. Esto último se condice con la realidad, en donde es posible ver que los usuarios de sistemas de transporte público masivo acceden o bien caminando para hacer ingreso al sistema o a través de algún sistema de transporte menor.

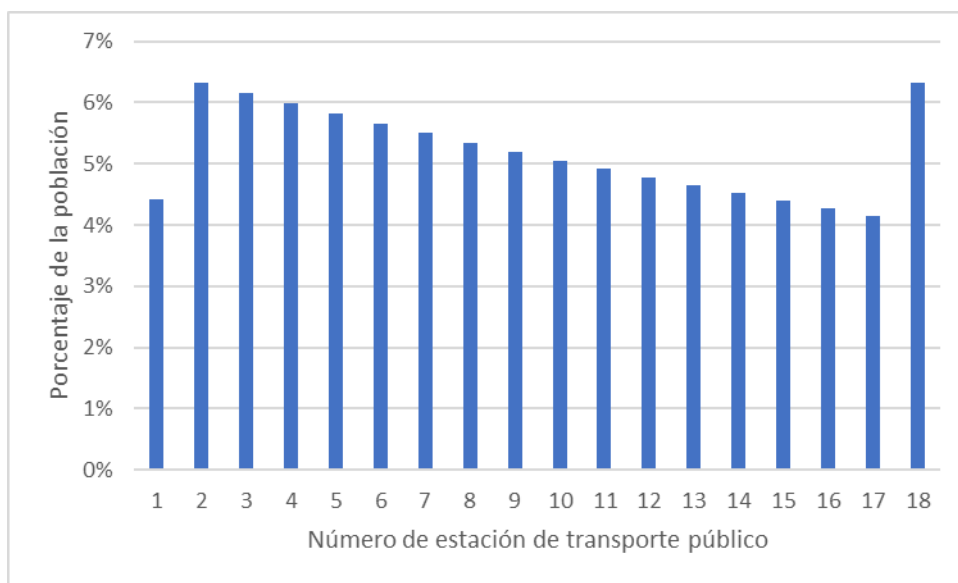


Figura 5.1: Porcentaje de residentes usuarios de cada una de las estaciones de transporte público (estación 18 es la más lejana al CBD).

En términos de características operacionales, en el óptimo social se necesita de una flota de 22 vehículos de capacidad 46 pasajeros para mantener operando el sistema, los cuales se demoran aproximadamente 19 minutos en una expedición desde la última estación hasta el CBD y tienen un tiempo de ciclo total de un poco más de 30 minutos. En el periodo analizado el costo privado de transporte público (ver Tabla 5.2) asciende a más de 14 mil dólares siendo el costo asociado a infraestructura, corredor y estaciones, la componente de mayor ponderación sobre el costo total con más de un 40%, seguido de los costos de capital y operación que representan aproximadamente un 30% de éstos. Por otra parte, la recaudación del sistema se encuentra por sobre los 17 mil dólares, dando cuenta de un sistema que se puede sostener sin un subsidio asociado.

Tabla 5.2: Desagregación del costo privado de transporte público (En Miles de US\$).

Capital	Operación	Estaciones	Corredor	Total
4.24	3.92	0.96	4.96	14.08

En base al diseño óptimo se obtiene una ciudad con una extensión de 11.5 km sin la presencia de suburbios desconectados (ver Figura 5.2), lo que responde a que la extensión del corredor, principal factor en la formación de suburbios desconectados, y sus consecuentes costos de infraestructura, no generan los beneficios suficientes para ser extendidos de forma tal de crear suburbios desconectados.

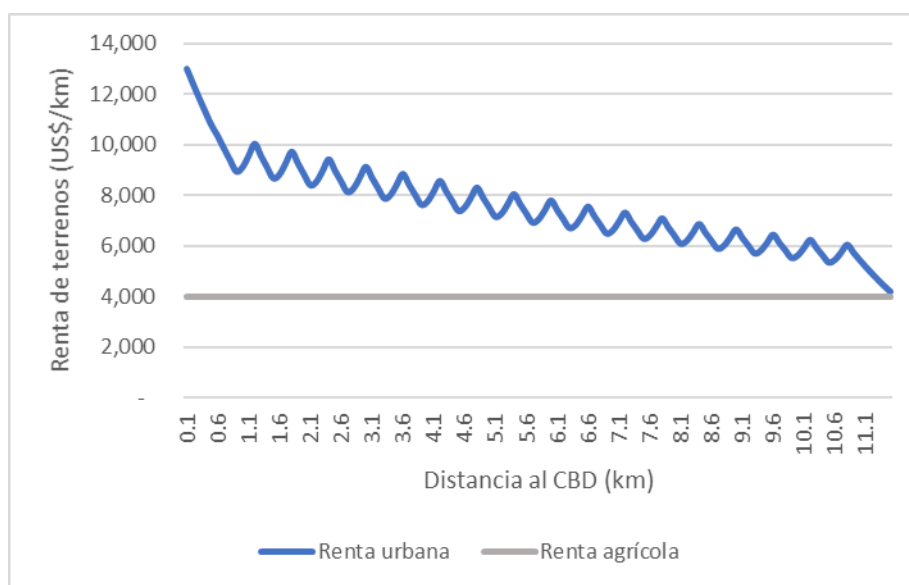


Figura 5.2: Renta de terrenos en el óptimo social con una estructura de línea única.

El beneficio social óptimo asciende a MUS\$ 148.58, de los cuales aproximadamente un 70% corresponde al cambio en el bienestar de los residentes dado por el sistema de transporte y sus consiguientes consecuencias urbanas, un 26.8% se debe al valor generado en los terrenos urbanos y el porcentaje menor a la operación del transporte público.

Tabla 5.3: Desagregación del beneficio social en el óptimo (en Miles de US\$).

Residentes	Operación de transporte público	Rentas de terrenos	Beneficio social
105.1	3.66	39.82	148.58

### 5.1.2 Análisis de estructura espacial del corredor

En este apartado se estudia en detalle la estructura interna del corredor de transporte público, entendiéndose por ésta la localización espacial de las estaciones y distancia entre éstas. En este caso se rompe el supuesto de equidistancia utilizando el enfoque de modelación mostrado en la sección 3.4.4. En concreto se analiza si es que es posible encontrar una configuración de corredor con espaciamiento entre paraderos no constante, que mejore el bienestar social encontrado con estaciones equidistantes y estructura de línea única, entendiendo las razones, en el caso que exista, de la mejora. Para ello la estrategia utilizada es buscar la estructura de corredor, según la modelación realizada en la sección 3.4.4, que mejora el bienestar social sobre el diseño realizado previamente en esta sección (caso base), es decir, se mantiene una frecuencia de 41 veh/h, una tarifa de US\$1.9 y una capacidad de 46 pax/veh.

En base a las simulaciones realizadas se encuentra que sí es posible mejorar el bienestar social modificando la estructura espacial de las detenciones en el transporte público. La estructura de corredor que maximiza el bienestar social sobre el escenario base (subsección 5.1.1) es una estructura con espaciamiento entre paradas no monótono con la distancia al CBD. En específico, en el corredor óptimo (ver Tabla 5.4) la primera parada de transporte público se debe localizar a 800 metros del CBD, la segunda parada a 600 metros y las siguientes se localizan cada vez más cerca una de las otras hasta llegar a un espaciamiento de aproximadamente 470 metros entre la treceava y catorceava parada (ver Figura 5.3), posteriormente el espaciamiento comienza a aumentar levemente hasta el final del corredor con una distancia entre la última y penúltima parada de aproximadamente 500 metros (ver Figura 5.4).

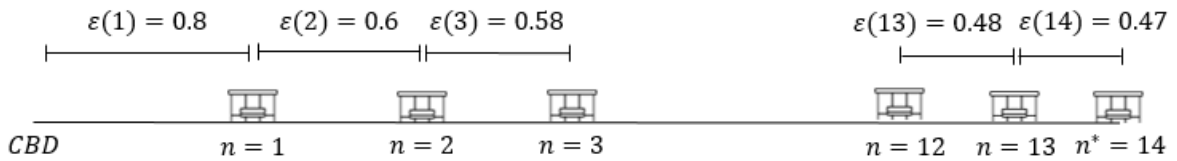


Figura 5.3: Estructura espacial interna del corredor hasta la catorceava estación ( $\varepsilon(n)$ : espaciamiento entre la estación  $n$  y  $n - 1$  en km).

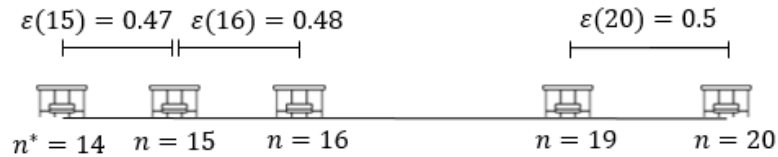


Figura 5.4: Estructura espacial interna hacia el final del corredor ( $\varepsilon(n)$ : espaciamiento entre la estación  $n$  y  $n - 1$  en km).

El mayor espaciamiento entre la primera estación y el CBD da cuenta de un uso eficiente de los recursos. Cuando se impone una estructura de paradas equidistante la primera estación de transporte público se tiende a subutilizar dado que los usuarios que residen en las cercanías del CBD prefieren caminar a éste. Por otra parte, tal como se muestra en la literatura (ver sección 2.2.4), es óptimo que las estaciones se encuentran a una menor distancia unas de otras en la medida que la distancia al CBD es mayor, aunque con la salvedad de que hacia el final del corredor, en donde hay una menor densidad poblacional, es óptimo que exista un aumento del espaciamiento entre estaciones.

Tabla 5.4: Parámetros que modelan la estructura interna del corredor en el óptimo social.

$\phi$	$\gamma$	$\underline{\delta}$	$\bar{\delta}$	$n^*$	$N$
0.8	0.6	0.98	1.01	14	20

El bienestar social aumenta levemente (ver Tabla 5.3 y Tabla 5.5), mejora que se encuentra dada por el valor generado en los terrenos urbanos y por el beneficio de los residentes. El mayor valor de los terrenos se debe a que al espaciar las estaciones a una menor distancia entre sí y tener un

corredor con una mayor cantidad de estaciones genera una mayor plusvalía en una misma longitud, debido principalmente a la mejora en los tiempos de acceso de los residentes de las zonas suburbanas, la cual no se ve contrarrestada por las mayores detenciones del sistema y que repercute en el mayor beneficio para los usuarios.

Tabla 5.5: Desagregación del beneficio social en el óptimo con una estructura de corredor no equidistante (en Miles de US\$).

Residentes	Operación de transporte público	Rentas de terrenos	Beneficio social
105.7	3.5	39.92	149.12

## 5.2 Línea con Transbordo

En esta sección se estudia el diseño óptimo del sistema de transporte al considerar una estructura de líneas con transbordo (ver sección 3.4.2). En la primera subsección se describe la ciudad obtenida con el diseño óptimo en un escenario en el cual se considera una penalidad por transbordo (ver Tabla 4.1) y otro en que no ( $t_{tr}$ ), mientras que en la segunda parte se comparan estos resultados con el óptimo obtenido en el caso base (línea única de transporte con estaciones equidistantes). Cabe mencionar que la penalidad de transbordo se concibe como el costo adicional para el usuario que conlleva el sólo hecho de transbordar.

### 5.2.1 Descripción General del Óptimo Social

#### 5.2.1.1 Sin Penalidad de Transbordo

El máximo bienestar social se alcanza (ver Tabla 5.6 y Tabla 5.8) con una línea de transporte que recorre las primeras trece estaciones con una flota de 19 buses con capacidad 40 pax/veh y frecuencia de 47 veh/h y otra línea que recorre desde la estación número 13 hasta la última estación con 5 buses de capacidad 18 pax/veh y una frecuencia de 27 veh/h. Para esta estructura de línea la longitud del corredor óptima es de 10.8 km con 18 estaciones a una distancia de 0.6 km entre ellas. La tarifa óptima asciende a US\$2 por entrar al sistema de transporte público. Este diseño genera un beneficio social que asciende a MUS\$148.8.

Tabla 5.6: Variables de diseño en el óptimo social con una estructura de línea con transbordo.

$f'$ (veh/h)	$f''$ (veh/h)	$d$ (km)	$e$ (US\$)	$K'$ (pax/veh)	$K''$ (pax/veh)	$N'$	$N$
47	27	0.6	2	40	18	13	18

En el óptimo la partición modal de transporte público asciende al 93.31% de la población, de los cuales aproximadamente sólo el 25% deben transbordar para poder llegar al CBD. En términos de características operacionales, los 19 buses que sirven la parte cercana al CBD tienen un tiempo de ciclo en su operación de un poco más de 23 minutos, mientras que los que sirven los suburbios tienen un tiempo de ciclo de 10 minutos. En el periodo analizado, el costo privado de transporte público (ver Tabla 5.7), a diferencia del caso de una estructura de línea única, asciende a menos de 14 mil dólares, dando cuenta de la mayor eficiencia operacional del sistema, mientras que la recaudación del sistema se encuentra por sobre los 17 mil dólares.

Tabla 5.7: Desagregación del costo privado de transporte público (En Miles de US\$).

Capital	Operación	Estaciones	Corredor	Total
4.23	3.66	0.96	4.96	13.81

La ciudad obtenida con el diseño que maximiza el bienestar social tiene extensión de 11.5 km sin la presencia de suburbios desconectados, lo que responde, al igual como en el caso de una sola línea, a la extensión del corredor, principal factor en la formación de suburbios desconectados.

Tabla 5.8: Desagregación del beneficio social con líneas con transbordo sin considerar penalidad de transbordo en el óptimo (en Miles de US\$).

Residentes	Operación de transporte público	Rentas de terrenos	Beneficio social
104.2	4.91	39.69	148.8

### 5.2.1.2 Con Penalidad de Transbordo

Al considerar una penalidad de transbordo el diseño óptimo (ver Tabla 5.9) consta de una línea de transporte que recorre las primeras 18 estaciones con una flota de 22 buses con capacidad 45 pax/veh y frecuencia de 41 veh/h y otra línea que recorre las últimas dos estaciones de la ciudad con 1 vehículo de capacidad 3 pax/veh y una frecuencia de 13 veh/h. Para esta estructura de línea la longitud del corredor óptima es de 11.4 km con 19 estaciones a una distancia de 0.6 km entre ellas. La tarifa óptima asciende a US\$1.9 por entrar al sistema de transporte público.

Tabla 5.9: Variables de diseño en el óptimo social con una estructura de línea con transbordo.

$f'$ (veh/h)	$f''$ (veh/h)	$d$ (km)	$e$ (US\$)	$K'$ (pax/veh)	$K''$ (pax/veh)	$N'$	$N$
41	13	0.6	1.9	45	3	18	19

En este escenario el corredor de transporte público se encuentra mucho más cerca del límite urbano que en cualquiera de las simulaciones realizadas a lo largo de esta investigación. A diferencia de lo discutido en la sección 5.1.1, en este caso es óptimo que exista un sistema de transporte público menor recorriendo los últimos kilómetros de la ciudad. A pesar de lo anterior, el máximo bienestar social alcanzado en este caso (ver Tabla 5.11) es menor al obtenido cuando no se considera la penalidad de transbordo. Intuitivamente, previo a realizar el desglose del beneficio social, se podría pensar que este resultado responde al costo adicional que impone sobre los usuarios de las zonas suburbanas la penalidad de transbordo, sin embargo, como el óptimo se obtiene cuando la estación de transbordo se encuentra en la penúltima estación del corredor y la longitud de este es mayor, entregando un mejor nivel de servicio al último tramo de la ciudad a través de una especie de servicio alimentador de transporte público menor cubriendo lo últimos 600 metros, el beneficio correspondiente a los residentes incluso aumenta en este caso, siendo el menor beneficio social dado por la operación de transporte público y valor generado en los terrenos. La estructura de línea con transbordo contrariamente a lo esperado aumenta tanto los costos de capital y operación como los asociados a infraestructura, además de tener una menor recaudación principalmente por una tarifa óptima levemente menor que en el caso en que no se considera una penalidad de transbordo. El resultado anterior puede ser contraintuitivo, sin embargo, refleja el hecho de que con penalidad de transbordo no es conveniente la existencia de un sistema de este tipo en la ciudad, el beneficio social alcanzado con el diseño óptimo en base a una estructura de línea única es mayor que en este escenario.

Tabla 5.10: Desagregación del costo privado de transporte público (En Miles de US\$).

Capital	Operación	Estaciones	Corredor	Total
4.31	3.97	1.02	5.23	14.53

Tabla 5.11: Desagregación del beneficio social con líneas con transbordo considerando una penalidad por transbordar (en Miles de US\$).

Residentes	Operación de transporte público	Rentas de terrenos	Beneficio social
105.5	3.23	39.44	148.18

## 5.2.2 Comparación con Estructura de Línea Única

En esta subsección se compara el diseño óptimo y equilibrio urbano obtenido con una estructura de línea con transbordo, sin considerar la penalidad de transbordo, respecto de la estructura de línea única.



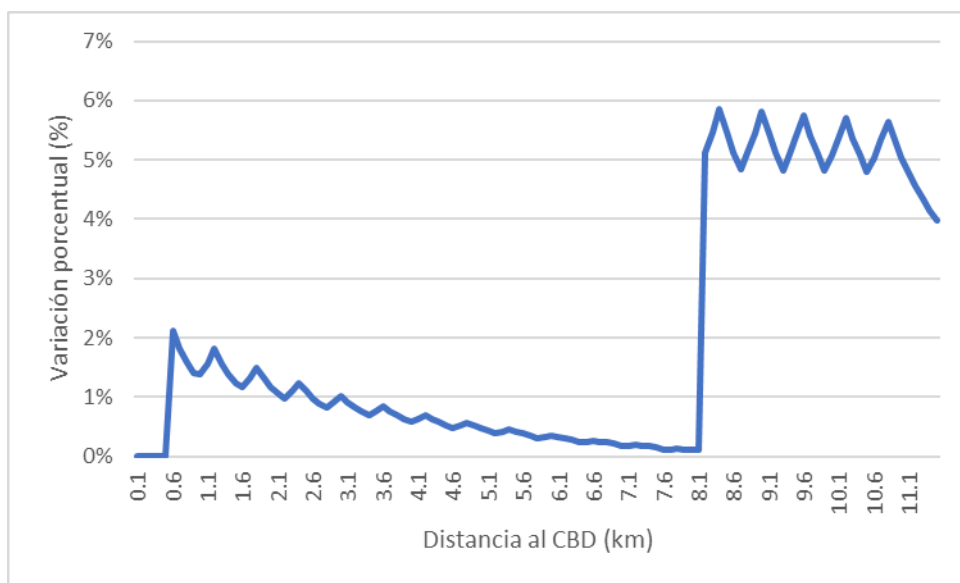


Figura 5.5: Variación en el costo de viaje al comparar el sistema óptimo de líneas de transporte con transbordo con el de línea única.

En términos urbanos se puede apreciar que el sistema óptimo de líneas con transbordo induce una ciudad de la misma longitud que con una línea única, con la diferencia de que al interior de esta existen cambios en cuanto a estructura urbana. Al igual como se muestra en la sección 4.4, las rentas se elevan en las zonas cercanas al CBD y disminuyen en los suburbios debido al costo adicional que implica tener que transbordar para llegar al centro de la ciudad (ver Figura 5.5). En este caso la renta de viviendas y terrenos aumenta en menos de un 1% en las zonas cercanas al CBD y en más de un 1% en el caso de las viviendas y en más de un 3% en el caso de los terrenos en las zonas suburbanas, es decir, donde los residentes transbordan para poder llegar al CBD. El cambio en las rentas de la ciudad responde al atractivo relativo que se puede generar en ciertas zonas y su consecuente aumento de la demanda residencial. En la Figura 5.7 se puede apreciar como aumenta la afluencia en las estaciones cercanas al CBD y disminuye de una manera más considerable en las zonas donde es obligatorio tener que transbordar para llegar al CBD con disminuciones entre el 2% y 3%.

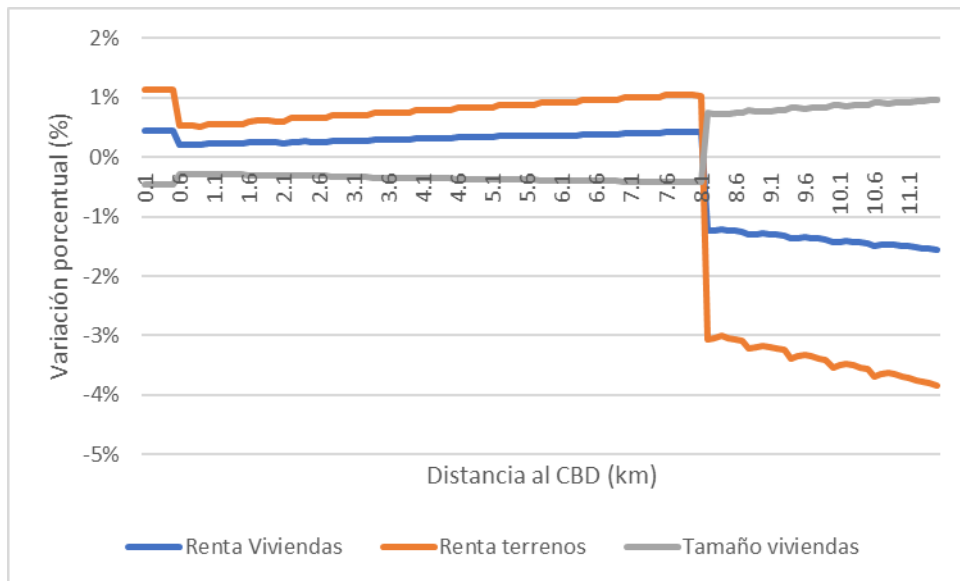


Figura 5.6: Variación en la renta de viviendas y terrenos y en el tamaño de viviendas al comparar el óptimo con una línea de transporte con transbordo y con una línea única.

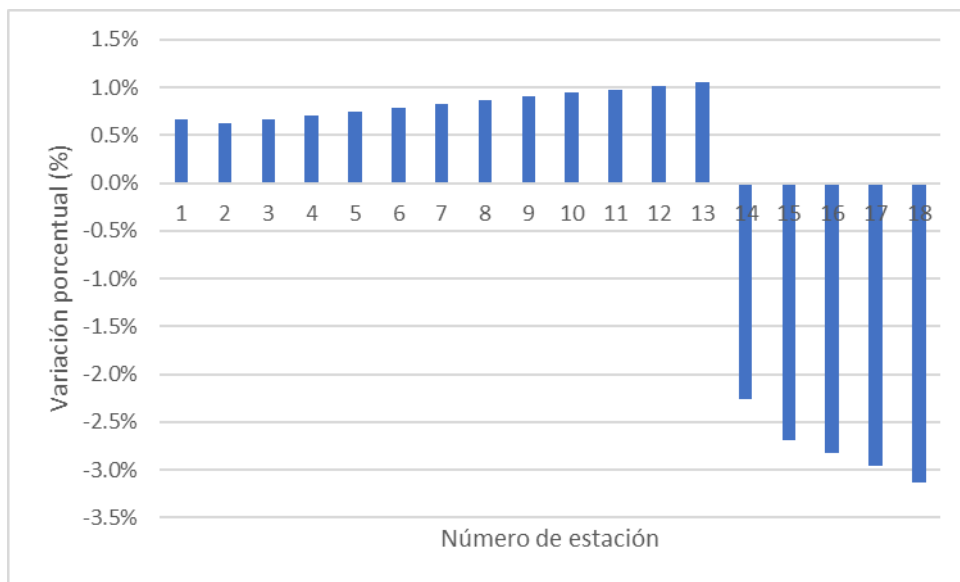


Figura 5.7: Variación porcentual en la afluencia por estación de transporte público al comparar el diseño óptimo con estructura de líneas con transbordo con el de línea única.

El sistema de transporte público óptimo en base a una estructura de línea con transbordo genera un mayor beneficio social que el sistema de línea única (ver Tabla 5.12). Si bien el beneficio de los residentes y el valor generado por los terrenos es menor, el mayor beneficio dado por una operación más eficiente del sistema de transporte público eleva el bienestar social. El menor beneficio de los residentes se debe a que introducir un esquema con transbordos para una parte importante de la población de la ciudad (23%) tiene un importante efecto en el costo generalizado de viaje de dichos usuarios quienes se ven expuestos a una mayor externalidad de descarga y a un tiempo de espera adicional en el sistema para poder llegar a sus puestos de trabajos. Por otra parte, el menor atractivo de las zonas suburbanas no alcanza a ser contrarrestado por el aumento de la plusvalía de las zonas

céntricas lo cual repercute en el valor generado por los terrenos urbanos a nivel agregado. La ventaja del sistema de transporte al tener líneas con transbordo yace en la eficiencia en el uso de los recursos y la reducción en la capacidad ociosa de éstos, los últimos 3.5 kilómetros de ciudad pueden ser servidos con buses de menor tamaño y a una mejor frecuencia que en las zonas céntricas de la ciudad.

Tabla 5.12: Variación en las componentes del beneficio social óptimo al comparar el sistema de líneas con transbordo con el de línea única (en Miles de US\$).

Residentes	Operación de transporte público	Rentas de terrenos	Beneficio social
-0.9	1.25	-0.13	0.22

## 5.3 Líneas Exclusivas

En esta subsección se estudia el diseño del sistema de transporte que maximiza el bienestar social al considerar una estructura de líneas exclusivas (ver sección 3.4.3). En primer lugar, se estudian las principales características del óptimo social, tanto a nivel de transporte público como de estructura urbana para luego realizar una comparación con el diseño óptimo con una sola línea de transporte.

### 5.3.1 Descripción general del Óptimo Social

El máximo bienestar social se alcanza (ver Tabla 5.13) con una línea de transporte que recorre las primeras ocho estaciones con una flota de 10 buses con capacidad 21 pax/veh y frecuencia de 39 veh/h y otra línea que sirve el resto de la ciudad con 8 buses de capacidad 51 pax/veh y una frecuencia de 21 veh/h. Para esta estructura de línea la longitud del corredor óptimo es de 12.6 km con 21 estaciones a una distancia de 0.6 km entre ellas. La tarifa óptima asciende a US\$2 por entrar al sistema de transporte público.

Tabla 5.13: Variables de diseño en el óptimo social con una estructura de líneas exclusivas.

$f^*$ (veh/h)	$f^{**}$ (veh/h)	$d$ (km)	$e$ (US\$)	$K^*$ (pax/veh)	$K^{**}$ (pax/veh)	$N^*$	$N$
39	21	0.6	2	21	51	9	21

La partición modal del transporte público con este diseño es de un 94.12% de la población total. De los usuarios de transporte público aproximadamente un 43% utiliza el servicio que sirve la zona más cercana al CBD mientras que el porcentaje restante es trasladado al CBD a través de la otra línea de transporte. En el óptimo se obtiene una ciudad con un límite urbano a 13 km del CBD sin la presencia de suburbios desconectado.

En el periodo analizado el costo privado de transporte público (ver Tabla 5.14) asciende a casi 14 mil dólares con el costo asociado a infraestructura, corredor y estaciones, representando aproximadamente la mitad de los costos totales, y el costo de capital y operación, el 23% y 27% restante, respectivamente. Por otra parte, la recaudación del sistema en el periodo de interés se encuentra por sobre los 18 mil dólares.

Tabla 5.14: Desagregación del costo privado de transporte público (En Miles de US\$).

Capital	Operación	Estaciones	Corredor	Total
3.21	3.78	1.13	5.79	13.91

El beneficio social óptimo asciende a MUS\$ 151.6, de los cuales la mayor parte, aproximadamente un 75%, corresponde al cambio en el bienestar de los residentes dado por el sistema de transporte, un 22% al valor generado en los terrenos urbanos y lo restante se debe a los beneficios privados generados por el sistema de transporte.

Tabla 5.15: Desagregación del beneficio social en el óptimo (en Miles de US\$).

Residentes	Operación de transporte público	Rentas de terrenos	Beneficio social
113.00	4.89	33.74	151.63

### 5.3.2 Comparación con Estructura de Línea Única

La ventaja de tener dos líneas de transporte sirviendo cada zona tienen que ver con la posibilidad de trasladar en un menor tiempo a los usuarios que viven lejos del CBD por las menores externalidades de carga y descarga y las detenciones asociadas a éstas (ver Figura 5.8). En las cercanías del CBD el costo generalizado de los usuarios se eleva levemente en no más de un 1% aproximadamente, sin embargo, la línea que recorre los suburbios disminuye hasta en más de un 5% el costo generalizado de viaje de algunos usuarios. Esta ventaja conforme aumenta la distancia al CBD va disminuyendo, pero en gran parte de la zona suburbana entre el kilómetro 5 a 8 es una caída superior al 2% del costo generalizado.

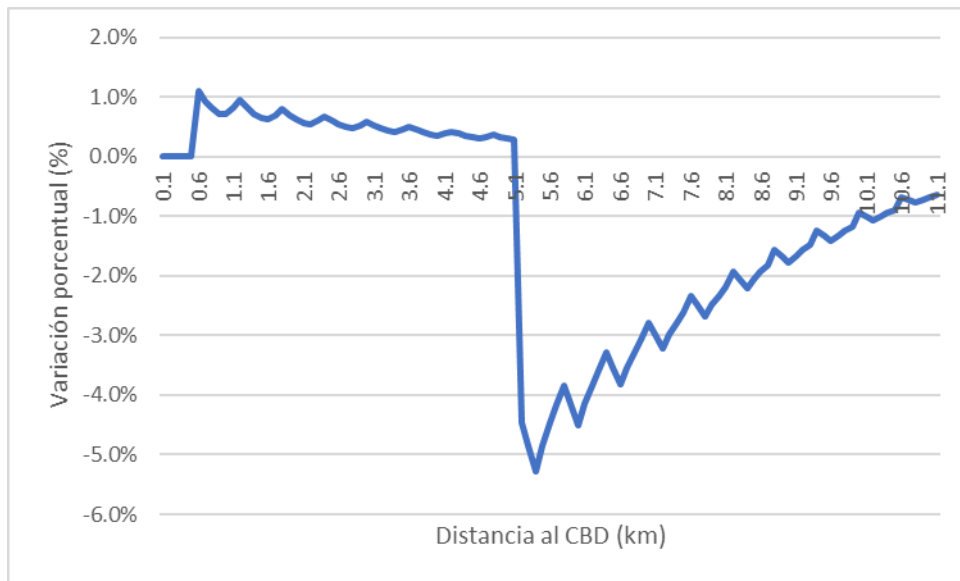


Figura 5.8: Variación del costo generalizado de viaje al comparar el óptimo con líneas exclusivas de transporte con el óptimo en base a una línea única.

El corredor óptimo con líneas exclusivas es 1.8 km más largo que el de línea única, lo cual incide directamente en el límite urbano el cual se encuentra 1.5 km más lejos del CBD. La mayor longitud del corredor eleva la plusvalía de los terrenos suburbanos incentivando desarrollos inmobiliarios en suelo que con otro tipo de estructura en el sistema de transporte sería utilizado con fines agrícolas. Como la ciudad tiene una mayor extensión la afluencia por estación decrece tal como se ve en la Figura 5.9.

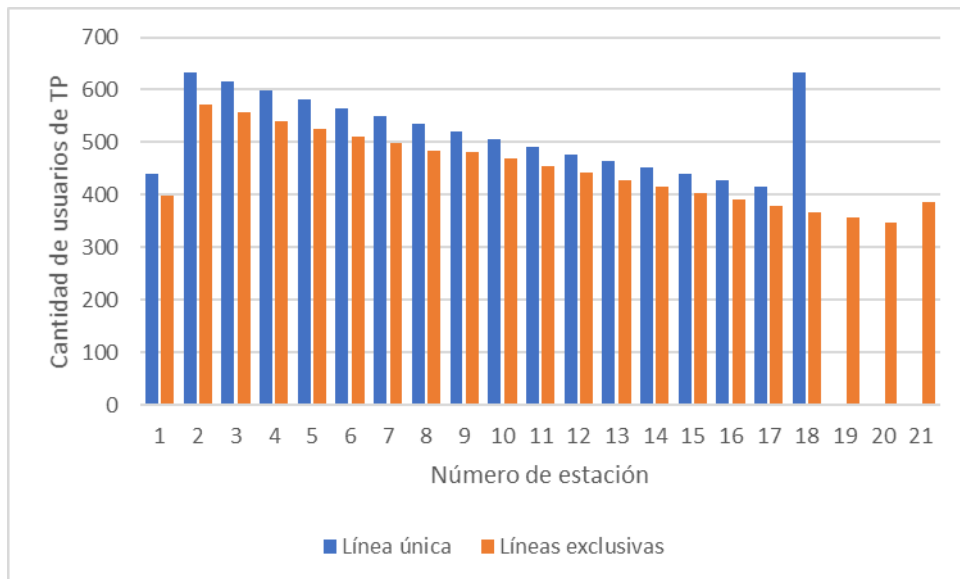


Figura 5.9: Afluencia por estación de transporte público al comparar el óptimo con líneas exclusivas de transporte con el óptimo con línea única.

Si bien los suburbios son más atractivos relativamente para residir y más personas viven en ellos al comparar con el sistema de línea única, el hecho de que la ciudad se extienda en 1.5 km provoca que la densidad poblacional sea menor a lo largo de toda la ciudad, con lo cual, el precio de renta tanto de viviendas como de terrenos es menor a lo largo de toda la ciudad y el tamaño de las viviendas es mayor (ver Figura 5.10). Esto último tiene un beneficio directo en los residentes ya que el espacio de las viviendas, en este modelo, es la única característica de las viviendas que le genera satisfacción a los residentes, de esta manera, con este tipo de equilibrio urbano todos los residentes poseen viviendas que les otorgan mayor bienestar. Cabe mencionar que los quiebres estructurales vistos en la sección 4.5 aún se mantienen en este caso.

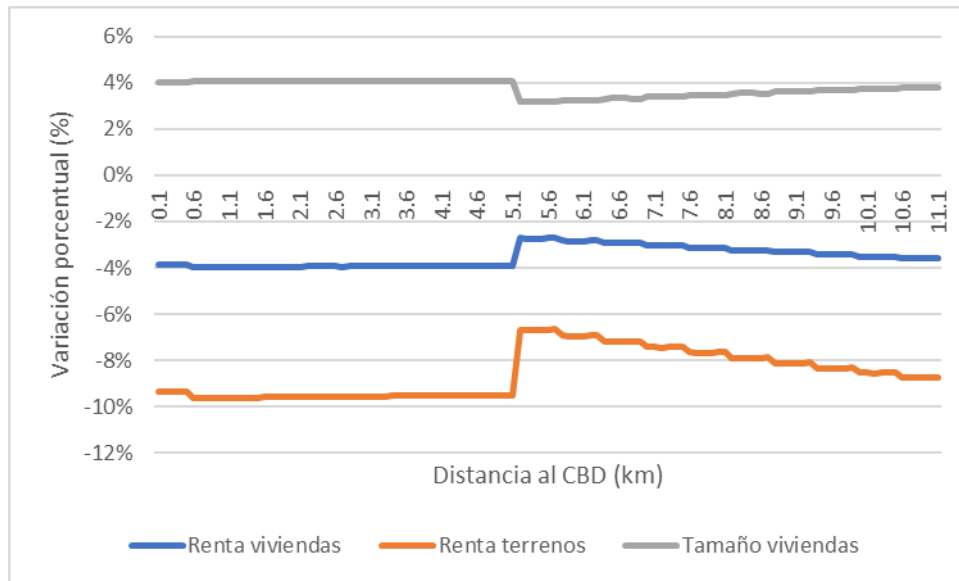


Figura 5.10: Variación en la renta de viviendas y terrenos y en el tamaño de viviendas al comparar el óptimo con líneas exclusivas de transporte con el óptimo con línea única.

El beneficio social alcanzado en la ciudad con el diseño óptimo basado en estructura de líneas exclusivas es mayor al generado por una única línea de transporte (ver Tabla 5.16). Esto se encuentra dado principalmente por el bienestar de los residentes de la ciudad, consecuencia directa de que la exclusividad de líneas entrega un mejor nivel de servicio para las zonas suburbanas disminuyendo el costo generalizado de viaje y la extensión de la ciudad que permite que los individuos residan en viviendas de mayor tamaño, y por los mayores beneficios generados a nivel privado en el transporte público. De todas las categorías que componen el bienestar social sólo una disminuye, la cual es el valor generado por los terrenos urbanos, lo cual se debe a la extensión urbana que induce la estructura de líneas exclusivas y la menor demanda residencial a lo largo de toda la ciudad que disminuye el valor de los terrenos a lo largo de toda la ciudad.

Tabla 5.16: Variación en las componentes del beneficio social óptimo al comparar el sistema de líneas exclusivas con el de línea única (en Miles de US\$).

Residentes	Operación de transporte público	Rentas de terrenos	Beneficio social
7.9	1.23	-6.08	3.05

## 5.4 Sistema de Transporte Público Óptimo

En base a lo estudiado a lo largo de este capítulo se concluye que el sistema de transporte público óptimo, entendido éste como la combinación de variables de diseño que maximizan el bienestar de la sociedad, es aquel en que se tiene (ver sección 3.4.3) una línea de transporte sirviendo exclusivamente una cierta zona cercana al CBD y otra línea sirviendo los suburbios. Si bien el sistema de transporte óptimo con líneas con transbordo sin considerar la penalidad asociada a éste también mejora el bienestar social del sistema óptimo línea de transporte única, la conveniencia del sistema con líneas exclusivas radica en que, al disminuir el costo generalizado de viaje de las zonas suburbanas incentiva el desarrollo inmobiliario en terrenos que, de no existir este tipo de estructura de línea, serían destinados al uso agrícola, incentivando de esta manera la expansión del límite urbano. Esto último tiene mucha relevancia ya que, si bien los suburbios son relativamente más atractivos para vivir, la expansión urbana disminuye la demanda residencial relativamente, disminuyendo las rentas a lo largo de toda la ciudad y permitiendo que todos los residentes vivan en un mayor espacio de vivienda, el único atributo que caracteriza las residencias de los habitantes de la ciudad.

# Capítulo VI

## 6 Conclusiones y Líneas Futuras de Investigación

### 6.1 Síntesis y Conclusiones

En la presente investigación se ha estudiado el diseño óptimo de un sistema de transporte público considerando la interacción que éste tiene con la estructura urbana, entendiéndose por ésta el comportamiento de las rentas, densidades y tamaño de viviendas según la distancia al CBD.

En primer lugar, se revisaron los principales aportes realizados por la literatura de economía urbana en temas relacionados con transporte, a nivel general, y transporte público, encontrando que temas como la congestión y su tarificación, subsidios o la inclusión de más de un modo de transporte y sus efectos urbanos, entre otros, sí han sido estudiados, aunque en su mayoría con una modelación no muy detallada del modo transporte público, ignorando la existencia de detenciones propias de este tipo de sistema y tiempos de subida y bajada asociados. Por otra parte, la literatura de análisis microeconómico de sistemas de transporte público, y diseño óptimo de éste, si se ha encargado de modelar en detalle este modo a través de sus variables de diseño y estructuras de líneas, pero no ha considerado el efecto que éstas pueden tener en la estructura urbana y la posible relocalización de los usuarios en base a las variables de diseño. Luego, se detalla la modelación realizada, en donde se destaca el aporte de incluir las externalidades de carga y descarga propias de un sistema de transporte público, capturar la estructura espacial interna del corredor de transporte público y la capacidad de modelar diferentes estructuras de líneas en un contexto interrelacionado con la estructura urbana y relocalización residencial, además de contribuir con una explicación en la formación de suburbios desconectados. Finalmente, la parte medular de esta investigación se encuentra en los capítulos 4 y 5, en donde, se muestran los efectos urbanos que el transporte público genera y el diseño de éste que maximiza el bienestar social.

Esta investigación deja en claro el efecto que las variables de diseño y estructura de líneas tienen en la estructura urbana. Dentro de los principales hallazgos se encuentra que la longitud del corredor de transporte público extiende el límite urbano elevando el valor de los terrenos y viviendas de estas zonas y contribuyendo a la formación de suburbios desconectados. Además, se muestra que ante aumentos importantes en la frecuencia del sistema y/o cambios a la baja significativos en las tarifas de transporte público, el valor de las zonas suburbanas aumenta en conjunto con sus densidades poblacional y estructural, además de un aumento en el tamaño de las viviendas en el sector céntrico de la ciudad. En lo que respecta a estructura de líneas se muestra que la sola introducción de una estación de transbordo en el sistema con una línea sirviendo la zona suburbana de la ciudad y otra la zona más cercana al CBD vuelve mucho más atractivo



relativamente localizarse en las cercanías del centro de la ciudad, elevando la demanda residencial de estas zonas y en consecuencia las rentas asociadas a éstas, mientras que el solo hecho de servir los suburbios a través de una línea independiente de la que sirve la zona más cercana al CBD genera el efecto contrario.

En cuanto a la estructura de diseño óptima, se encuentra que las líneas exclusivas son la mejor forma de servir la ciudad monocéntrica lineal, esto dado principalmente por la disminución del costo generalizado de viaje en gran parte de la ciudad y el mayor espacio para vivir por vivienda, principal atributo de éstas, dado por la extensión del límite urbano, consecuencia del aumento del valor de zonas que sin la existencia de un corredor de transporte público cercano no serían lo suficientemente atractivas para desarrollos inmobiliarios, y las menores rentas tanto de terrenos como de viviendas que prevalecen a lo largo de toda la ciudad. También se muestra que el diseño óptimo en base a líneas con transbordo puede mejorar el bienestar de los ciudadanos, en la medida que la penalidad de transbordo sea nula o tienda a esto, debido a los menores costos de la operación de transporte público y la mejora en la eficiencia de uso de los recursos privados, mientras que en el caso en que la penalidad de transbordo es no nula el bienestar social no logra superar a la estructura de línea única. Finalmente, en lo que respecta a la estructura interna del corredor de transporte público se encuentra que un espaciamiento no monótono con la distancia al CBD mejora el bienestar social.

## **6.2 Líneas Futuras de Investigación**

La presente investigación puede ser extendida a través de diferentes aristas. Lo más directo es adicionar otro tipo de estructuras o esquemas de servicio, tales como, dos líneas expresas que se van deteniendo estación por medio, líneas compartidas y más de dos líneas exclusivas, en el extremo una por cada estación o paradero, y/o estudiar cuántas son convenientes en base a ciertos parámetros urbanos, entre otras estructuras de líneas.

A lo largo de la investigación, es posible apreciar las altas particiones modales de transporte público obtenidas por el modelo, claramente existe una distorsión al no considerar el modo auto privado. Esto supone un importante reto ya que la asignación de usuarios por modo se complejiza en la medida que se agregan modos de transporte.

En este modelo se han supuesto individuos completamente idénticos, sin embargo, tal como se vio en la revisión bibliográfica, existen estudios que han mostrado como cambian los patrones residenciales entre personas de altos ingreso y bajos ingreso ante cambios en la tecnología de transporte. Sería un aporte importante a la investigación ver si estas conclusiones se mantienen con un sistema de transporte público optimizado, en el contexto del modelo monocéntrico, ya sea sólo con el modo transporte público y caminata o agregando el modo auto.

A lo largo de toda esta investigación se ha ignorado el fenómeno de la congestión entre buses en paraderos y en el caso de existir el modo auto, la congestión vehicular que estos pueden causar sobre el sistema de transporte público en el caso de tráfico mixto. Como se vio en la revisión el fenómeno de la congestión ha sido ampliamente estudiado en economía urbana, sin embargo, en ningún caso, con un modelo detallado de transporte público como el presentado aquí. De la misma manera tarificación vial de primer, segundo mejor u otro, en este contexto, tampoco se ha llevado a cabo.

Finalmente, también queda abierta la posibilidad para estudiar la conveniencia del tipo de sistema de transporte para una cierta ciudad según ciertos parámetros urbanos exógenos, tales como, población o nivel de ingreso, entre otros. Metro, BRT, tranvías o combinaciones de éstos podrían ser estudiados y diferenciados según las diferentes variables de diseño y estructuras y magnitudes de costos asociadas.

## Bibliografía

- Agostini, C., & Palmucci, G. (2008). Capitalización anticipada del metro de Santiago en el precio de las viviendas. *El Trimestre Económico*, 403-431.
- Alonso, W. (1964). *Location and land use*. Harvard University Press Cambridge, MA, 1964.
- Arnott, R. (1979). Unpriced transport congestion. *Journal of economic theory*, 21, 294-316.
- Basso, L., Navarro, M. y Silva, H. (2018). *Public Transport and Urban Structure*. Working Paper.
- Baum-Snow, N. (2007a). Suburbanization and transportation in the monocentric model. *Journal of Urban Economics*, 62(3), 405-423.
- Baum-Snow, N. (2007b). Did highways cause suburbanization?. *The quarterly journal of economics*, 122(2), 775-805.
- Baum-Snow, N., Brandt, L., Henderson, J. V., Turner, M. A., & Zhang, Q. (2017). Roads, railroads, and decentralization of Chinese cities. *Review of Economics and Statistics*, 99(3), 435-448.
- Becker, G. S. (1965). A Theory of the Allocation of Time. *The economic journal*, 493-517.
- Bertaud, A., & Brueckner, J. K. (2005). Analyzing building-height restrictions: predicted impacts and welfare costs. *Regional Science and Urban Economics*, 35(2), 109-125.
- Bowes, D. R., & Ihlanfeldt, K. R. (2001). Identifying the impacts of rail transit stations on residential property values. *Journal of Urban Economics*, 50(1), 1-25.
- Brueckner, J. K., & Fansler, D. A. (1983). The economics of urban sprawl: Theory and evidence on the spatial sizes of cities. *The review of Economics and Statistics*, 479-482.
- Brueckner, J. K. (1987). The structure of urban equilibria: A unified treatment of the Muth-Mills model. In *Handbook of regional and urban economics* (Vol. 2, pp. 821-845). Elsevier.
- Brueckner, J. K., & Kim, H. A. (2003). Urban sprawl and the property tax. *International Tax and Public Finance*, 10(1), 5-23.
- Brueckner, J. K. (2005). Transport subsidies, system choice, and urban sprawl. *Regional Science and Urban Economics*, 35(6), 715-733.
- Brueckner, J. K., & Selod, H. (2006). The political economy of urban transport-system choice. *Journal of Public Economics*, 90(6-7), 983-1005.
- Capozza, D. (1973). Subways and land use. *Environment and Planning A*, 5(5), 555-576.

- Chang, S. K., & Schonfeld, P. M. (1991). Multiple period optimization of bus transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(6), 453-478.
- Council, A. T. (2006). National guidelines for transport system management in Australia. Background material, 5.
- Currie, G. (2005). The demand performance of bus rapid transit. *Journal of public transportation*, 8(1), 3.
- Daniels, P. W., & Warnes, A. M. (2013). *Movement in cities: Spatial perspectives on urban transport and travel*. routledge.
- Duranton, G., & Puga, D. (2015). Urban land use. In *Handbook of regional and urban economics* (Vol. 5, pp. 467-560). Elsevier.
- Evans, A. W., & Morrison, A. D. (1997). Incorporating accident risk and disruption in economic models of public transport. *Journal of Transport Economics and Policy*, 117-146.
- Fielbaum, A., Jara-Díaz, S., & Gschwender, A. (2016). Optimal public transport networks for a general urban structure. *Transportation Research Part B: Methodological*, 94, 298-313.
- Fujita, M. (1989). *Urban economic theory: land use and city size*. Cambridge university press.
- Glaeser, E. L., Kahn, M. E., & Rappaport, J. (2000). Why do the poor live in cities? (No. w7636). National Bureau of Economic Research.
- Gschwender, A., Jara-Díaz, S., & Bravo, C. (2016). Feeder-trunk or direct lines? Economies of density, transfer costs and transit structure in an urban context. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 88, 209-222.
- Guzman, G. G. (2018). Household income: 2017. US Department of Commerce, Economics and Statistics Administration, US Census Bureau.
- Haring, J. E., Slobko, T., & Chapman, J. (1976). The impact of alternative transportation systems on urban structure. *Journal of Urban Economics*, 3(1), 14-30.
- Jansson, J. O. (1980). A simple bus line model for optimisation of service frequency and bus size. *Journal of Transport Economics and Policy*, 53-80.
- Jara-Díaz, S. R., Gschwender, A., & Ortega, M. (2012). Is public transport based on transfers optimal? A theoretical investigation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(7), 808-816.
- Jara-Díaz, S., & Gschwender, A. (2003a). Towards a general microeconomic model for the operation of public transport. *Transport Reviews*, 23(4), 453-469.

- Jara-Díaz, S. R., & Gschwender, A. (2003b). From the single line model to the spatial structure of transit services: corridors or direct?. *Journal of Transport Economics and Policy (JTEP)*, 37(2), 261-277.
- Jara-Díaz, S., Gschwender, A., & Bravo, C. (2018). Total cost minimizing transit route structures considering trips towards CBD and periphery. *Transportation*, 45(6), 1701-1720.
- Kocur, G., & Hendrickson, C. (1982). Design of local bus service with demand equilibration. *Transportation Science*, 16(2), 149-170
- Kraus, M. (1989). The welfare gains from pricing road congestion using automatic vehicle identification and on-vehicle meters. *Journal of Urban Economics*, 25(3), 261-281.
- Kraus, M. (1991). Discomfort externalities and marginal cost transit fares. *Journal of Urban Economics*, 29(2), 249-259.
- Li, Z. C., Lam, W. H., Wong, S. C., & Choi, K. (2012). Modeling the effects of integrated rail and property development on the design of rail line services in a linear monocentric city. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(6), 710-728.
- LeRoy, S. F., & Sonstelie, J. (1983). Paradise lost and regained: Transportation innovation, income, and residential location. *Journal of Urban Economics*, 13(1), 67-89.
- Mohring, H. (1972). Optimization and scale economies in urban bus transportation. *The American Economic Review*, 62(4), 591-604.
- Mills, E. S. (1967). An aggregative model of resource allocation in a metropolitan area. *The American Economic Review*, 57(2), 197-210.
- Mun, S. I., Konishi, K. J., & Yoshikawa, K. (2003). Optimal cordon pricing. *Journal of Urban Economics*, 54(1), 21-38.
- Mun, S. y Taguchi, A. (2018). Design of mass transit system and urban spatial structure. Working Paper.
- Muth, R. F. (1969). *Cities and housing: The spatial pattern of urban residential land use*. University of Chicago, Chicago, 1969, 4, 144-123.
- Oldfield, R. H., & Bly, P. H. (1988). An analytic investigation of optimal bus size. *Transportation Research Part B: Methodological*, 22(5), 319-337.
- Rae, J. B. (1968). Transportation technology and the problem of the city. *Traffic Quarterly*, 22(3).
- Sagner, A. (2009). Determinantes del precio de viviendas en Chile. *Documentos de Trabajo (Banco Central de Chile)*, (549), 1
- Sasaki, K. (1989). Transportation system change and urban structure in two-transport mode setting. *Journal of Urban Economics*, 25(3), 346-367.

- Sasaki, K. (1990). Income class, modal choice, and urban spatial structure. *Journal of Urban Economics*, 27(3), 322-343.
- Solow, R. M. (1972). Congestion, density and the use of land in transportation. *The Swedish Journal of Economics*, 161-173.
- Sullivan, A. M. (1983a). The general equilibrium effects of congestion externalities. *Journal of Urban Economics*, 14(1), 80-104.
- Sullivan, A. M. (1983b). Second-best policies for congestion externalities. *Journal of Urban Economics*, 14(1), 105-123.
- Su, Q., & DeSalvo, J. S. (2008). The effect of transportation subsidies on urban sprawl. *Journal of regional science*, 48(3), 567-594.
- Tirachini, A., Hensher, D. A., & Jara-Díaz, S. R. (2010). Restating modal investment priority with an improved model for public transport analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 1148-1168.
- Tirachini, A., & Hensher, D. A. (2011). Bus congestion, optimal infrastructure investment and the choice of a fare collection system in dedicated bus corridors. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(5), 828-844.
- Verhoef, E. T. (2005). Second-best congestion pricing schemes in the monocentric city. *Journal of Urban Economics*, 58(3), 367-388.
- Vuchic, V. R., & Newell, G. F. (1968). Rapid transit interstation spacings for minimum travel time. *Transportation Science*, 2(4), 303-339.
- Vuchic, V. R. (1969). Rapid transit interstation spacings for maximum number of passengers. *Transportation Science*, 3(3), 214-232.
- Wright, L., & Hook, W. (2007). *Bus rapid transit planning guide*. Institute for Transportation and Development Policy, New York.
- Wu, J., & Plantinga, A. J. (2003). The influence of public open space on urban spatial structure. *Journal of Environmental Economics and Management*, 46(2), 288-309.

# Apéndice A. Desarrollo Analítico

## Apéndice A.1: Estructura Urbana

En todas las simulaciones numéricas realizadas en esta investigación se utiliza una función Cobb-Douglas para modelar la utilidad de los individuos, tal como se muestra a continuación:

$$U(c, q) = c^{1-\alpha} q^\alpha. \quad (62)$$

Al reemplazar la restricción presupuestaria en la función de utilidad, esta se puede escribir como:

$$U(c, q) = (I - pq - \rho(x))^{1-\alpha} q^\alpha. \quad (63)$$

Al maximizar la función de utilidad se obtiene:

$$-p(1 - \alpha)(I - pq - \rho(x))^{-\alpha} q^\alpha + \alpha(I - pq - \rho(x))^{1-\alpha} q^{\alpha-1} = 0,$$

$$\frac{\alpha(I - pq - \rho(x))^{1-\alpha} q^{\alpha-1}}{(1 - \alpha)(I - pq - \rho(x))^{-\alpha} q^\alpha} = p,$$

lo cual se traduce en la siguiente expresión simplificada:

$$\frac{\alpha(I - \rho(x))}{q} = p(x). \quad (64)$$

Luego reemplazando esto en la ecuación de equilibrio urbano (ecuación (5)) se obtienen expresiones para el precio de renta de las viviendas  $p$  y tamaño de éstas  $q$  en función del ingreso  $I$ , el costo de viaje  $\rho$  y el nivel de utilidad de equilibrio urbano  $u$ , las cuales se presentan a continuación:

$$q(x) = u^{1/\alpha} [(1 - \alpha)(I - \rho(x))]^{(\alpha-1)/\alpha}, \quad (65)$$

$$p(x) = \alpha(1 - \alpha)^{(1-\alpha)/\alpha} \left( \frac{I - \rho(x)}{u} \right)^{1/\alpha}. \quad (66)$$

De la misma manera, en el lado de la oferta de viviendas se utiliza una función Cobb-Douglas para modelar la función de producción asociada a ésta:

$$h(S) = gS^\beta. \quad (67)$$

Al utilizar esta forma funcional la condición de primer orden (ver ecuación (12)) se ve como sigue:

$$pg\beta S^{\beta-1} = i, \quad (68)$$

con lo cual se puede despejar la densidad estructural:

$$S = \left( \frac{i}{pg\beta} \right)^{1/(\beta-1)}, \quad (69)$$

y luego reemplazar la ecuación obtenida para el precio (ver ecuación (66)):

$$S(x) = \left( \frac{i u^{1/\alpha}}{\alpha(1-\alpha)^{(1-\alpha)/\alpha} (I-\rho(x))^{1/\alpha} g\beta} \right)^{1/(\beta-1)}, \quad (70)$$

Luego al reemplazar el precio (ecuación (66)) y densidad estructural (ecuación (70)) obtenidos, en la ecuación de beneficio nulo (ecuación (13)), la cual denota un equilibrio de largo plazo, se puede desprender una expresión para la renta de los terrenos:

$$r(x) = \left( \alpha(1-\alpha)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} g \left( \frac{I-\rho(x)}{u} \right)^{1/\alpha} \right)^{\frac{1}{1-\beta}} \left( \frac{i}{\beta} \right)^{\frac{\beta}{\beta-1}} (1-\beta). \quad (71)$$

De esta forma la densidad estructural y el valor de renta de los terrenos también quedan en función del ingreso  $I$ , el costo de viaje  $\rho$  y el nivel de utilidad de equilibrio urbano  $u$ , al igual como ocurre con  $p$  y  $q$ .

Utilizando la condición de equilibrio urbano (ecuación (14)) se encuentra una expresión para el nivel de utilidad de equilibrio urbano en función de la renta agrícola  $r_A$ , el ingreso de los individuos  $I$  y el costo de viaje  $\rho$ :



$$u = \left(\frac{r_A}{1-\beta}\right)^{\alpha(\beta-1)} \left(\frac{\beta}{i}\right)^{\alpha\beta} \left(\alpha(I - \rho(\bar{x}))^{\frac{1}{\alpha}}(1 - \alpha)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} g\right)^{\alpha}. \quad (72)$$

Para calcular la densidad poblacional, tal como se aprecia en la sección 3.3, se reemplaza la densidad estructural obtenida de la maximización (ecuación (70)) en la ecuación (67) y el resultado se divide por la ecuación (65), siempre reemplazando la utilidad de equilibrio mostrada en la ecuación (72), de esta manera se obtiene:

$$D(x) = \frac{r_A}{\alpha(1-\beta)} (I - \rho(\bar{x}))^{\frac{1}{\alpha(\beta-1)}} (I - \rho(x))^{\frac{\alpha(1-\beta)-1}{\alpha(\beta-1)}}. \quad (73)$$

Lo anteriormente mostrado son todas las ecuaciones que describen la estructura urbana al utilizar una función de utilidad del tipo Cobb-Douglas. Con estas formas funcionales se realizaron todas las simulaciones numéricas presentes en esta investigación.

## Apéndice B. Valor de los parámetros de simulación

### Apéndice B.1: Parámetros generales

El valor del porcentaje de ingreso gastado en vivienda  $\alpha$  se obtiene de la misma manera que en Basso et al (2018), es decir, se promedian los valores usados por Wu y Plantiga (2003), 0.5, y Bertaud y Brueckner (2005), 0.1. El poder de la función de producción  $\beta$  utilizado es el mismo que el de Bertaud y Brueckner (2005).

En Bertaud y Brueckner (2005), investigación que tiene como base el modelo teórico planteado en Brueckner (1987), se realizan simulaciones con un ingreso por hogar anual de US\$42,151, el cual proviene del censo del año 2,000 de los Estado Unidos. Para obtener el valor del tiempo en su modelo (salario por hora), ellos asumen 2,000 horas de trabajo para un trabajador por año y 1,25 trabajadores por hogar con lo cual obtienen un salario por hora de US\$16.86. Este es el mismo valor utilizado en la parametrización del valor del tiempo llevada a cabo por Basso et al (2018). En las simulaciones realizadas en este trabajo se actualizan los valores al considerar el ingreso medio anual de los hogares de Estado Unidos para el año 2017, el cual asciende a US\$60,336, según lo expuesto en Guzman (2018). De esta manera considerando 2,340 horas laborales anuales y 1.5 trabajadores por hogar se obtiene un salario por hora de US\$17.19.

En cuanto a las velocidades utilizadas, la velocidad de caminata,  $\mu$ , de 4 km/h, es consistente con lo utilizado por Basso et al (2018), mientras que la velocidad crucero del bus,  $v$ , de 50 km/h, es ad-hoc para un sistema BRT. La penalidad por aceleración y desaceleración,  $t_{dac}$ , de 7.95 segundos, se obtiene mediante las ecuaciones del movimiento rectilíneo uniforme de física, mientras que los tiempos de subida,  $t_s$ , y bajada,  $t_b$ , se basan en lo expuesto en Tirachini y Hensher (2011) y Jara-Díaz et al (2012).

### Apéndice B.2: Costo privado de transporte público

Al igual que en Tirachini y Hensher (2011) y Tirachini et al (2010) los datos utilizados para estimar los parámetros asociados a las funciones de costos provienen de ATC (2006) y Wright y Hook (2007). En el caso de ATC (2006), originalmente sus valores se encuentran en dólares australianos del año 2006, mientras que en Wright y Hook (2007) sus valores se encuentran en dólares de estados unidos del año 2007. Para efectos de esta investigación todos los valores presentados se han traspasado a dólares de Estados Unidos del año 2017 ajustando debidamente por inflación y poder de paridad de compra según corresponda. Cabe mencionar que tal como se muestra en Tirachini et al (2010), el costo de capital anual (CCA) por material rodante, tierra e infraestructura se calcula a partir de una anualidad, tal como se muestra en la siguiente fórmula:

$$CCA = (PC - VR) \cdot \frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^s}}$$

en donde  $PC$  es el precio de compra,  $VR$  es el valor residual,  $r$  es la tasa de descuento y  $s$  es la vida útil de los activos. Se considera una tasa de descuento de un 7% y un valor residual del 5% del precio inicial para el material rodante.

Al igual que en Tirachini et al (2010) para traspasar los cálculos anuales a costos por hora es necesario estimar la cantidad de horas equivalentes de operación de un período particular en un año. Tomando la punta mañana, ATC (2006) sugiere que el 8.8% de los vehículos-kilómetros de un día laboral son provistos en una hora punta de la mañana. De esta manera un día laboral completo equivale a 11.36 horas punta de la mañana. Luego, utilizando la cantidad de días de semana, fines de semana y feriados, además de la participación en los vehículos-kilómetros de cada uno de estos períodos, la cual se encuentra en ATC (2006) se puede estimar que un año es equivalente a 2,947 horas punta mañana de operación.

- Costos de personal y capital

En ATC (2006) se puede encontrar el costo de personal por hora-vehículo y los costos de capital por material rodante para distintos tamaños de vehículo, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla B.1: Costo de capital y personal según tamaño de buses en ATC (2006).

Capacidad (pax/veh)	Costo por personal (\$/veh-h)	Costo por bus (\$/bus-h)
19	30.66	4.98
40	30.66	8.58
64	30.66	11.67
81	30.66	13.34
101	30.66	18.41

Con esta información se realiza una regresión lineal para estimar las ecuaciones (21), (24), (26), (33), (34) y (35), obteniendo que:  $c_{10}$ ,  $c'_{10}$  y  $c_{10}^*$  son equivalentes a 32.66 US\$/veh-h y  $c_{11}$ ,  $c'_{11}$  y  $c_{11}^*$  a 0.15 US\$/pax-h.

- Costos de operación

En ATC (2006) se encuentra un desglose de costos de operación para diferentes tamaños de vehículos. El desglose considera los costos de personal en el vehículo, costos de operación directa por vehículo y gastos generales. Como los costos por personal ya fueron considerados en la subsección anterior, en esta sólo se consideran las dos últimas categorías. Los costos de operación directa hacen referencia al combustible, las mantenciones y neumáticos y se encuentran expresados en vehículos kilómetros. Por otra parte, en gastos generales se consideran cosas tales como recursos humanos, seguros, supervisiones, tecnologías de información, entre otras y corresponden a un porcentaje de los costos de operación (21%). En la siguiente tabla se presenta el detalle de los costos de operación (sin considerar los costos por personal) por vehículo-kilómetro para distintos tamaños de vehículos:

Tabla B.1: Costo de operación según tamaño de buses en ATC (2006).

Capacidad (pax/veh)	Costo de operación (\$/veh-h)
19	0.70
40	0.87
64	1.01
81	1.11
101	1.27

A partir de estos datos se estima, por medio de mínimos cuadrados ordinarios, las ecuaciones (22), (25), (27), (34) y (36). Se obtiene que:  $c_{20}$ ,  $c'_{20}$  y  $c_{20}^*$  ascienden a 0.58 US\$/veh-km y  $c_{21}$ ,  $c'_{21}$  y  $c_{21}^*$  a 0.0067 US\$/pax-km.

- Costo de Infraestructura

En Wright y Hook (2007) se encuentra que el costo de una estación de BRT de 5 metros de ancho es de US\$ 350,000. Ajustando este valor a dólares del año 2017 y utilizando el cálculo de anualidad descrito anteriormente se obtiene que el costo por estación es  $c_N = 10.72$  (en US\$/estación-h). En este mismo documento se pueden encontrar diversos valores para el costo de infraestructura por kilómetro de sistemas de BRT del mundo. Se destacan el sistema BRT de Curitiba y Bogotá, siendo el costo por kilómetro del primero de US\$ 2.5 millones y US\$ 5.3 millones en el caso del segundo. Si en un kilómetro se tienen 3 estaciones, es decir, un costo de US\$1.05 millones por kilómetro de corredor, parece razonable asumir un costo aproximado por kilómetro de infraestructura sin incluir estaciones de US\$ 3 millones. De esta forma ajustando los valores, al igual que como se realiza con el costo de las estaciones, se obtiene que  $c_L = 91.84$  (en US\$/km-h).