



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

MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE POLÍTICAS URBANAS EN
TRANSPORTE Y USO DE SUELO

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

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JUAN ANTONIO VILLABLANCA ZAPATA

PROFESOR GUÍA:
FRANCISCO MARTÍNEZ CONCHA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LUIS BRICEÑO ARIAS
ROBERTO COMINETTI COTTI-COMETTI
CRISTIÁN CORTÉS CARRILLO

SANTIAGO DE CHILE
JULIO 2013

Resumen

El conocimiento de ciertos índices de calidad urbana permite implementar políticas que mejoren algunos de estos índices, por medio de modelos que predigan el comportamiento de los usuarios en la ciudad. Al predecir lo anterior y teniendo algunas líneas de investigación abiertas, es posible plantearse objetivos que desarrollen metodologías de mejora.

Para mejorar los índices de calidad urbana, se utilizaron modelos de equilibrio integrado de transporte y uso de suelo con indicadores como la congestión, los tiempos de viaje y la segregación espacial según los ingresos, con su respectivo objetivo definido. Teniendo estos objetivos, se desarrollaron heurísticas que mejoraron los índices por medio de conceptos como el segundo principio de Wardrop, métodos de gradiente y optimización con restricciones. El comportamiento de cada una de estas heurísticas fue probado a través de diversas simulaciones.

La definición de estos índices obtenida a través de los equilibrios en cada escenario, permitieron cuantificar los niveles de congestión, tiempo consumido en la red y segregación espacial según ingresos, lo que arrojó determinado un nivel de referencia.

En la primera heurística, orientada en reducir el tiempo total consumido en la red, se encontraron resultados de equilibrio con tiempos de duración menor a 10 minutos, al igual que la estructura que desarrolla el problema de equilibrio integrado de transporte y uso de suelo.

La segunda heurística desarrollada que busca mejorar los niveles de congestión que hay en la red, tomó sobre 15 horas en encontrar los resultados planteados. Por su parte, la tercera heurística, que busca disminuir la segregación espacial según los ingresos, tomó alrededor de 6 horas en encontrarlos. Ambas fueron desarrolladas con una estructura diferente al equilibrio integrado de transporte y uso de suelo ya que incorporaron una etapa para el cálculo de las tarifas.

Los tres problemas planteados logran el objetivo de disminuir el índice de calidad urbana, por lo que aplicando las políticas encontradas es posible llegar a un equilibrio integrado de transporte y uso de suelo con mejores índices.

Como resultado, los modelos planteados y desarrollados permiten cambiar el comportamiento de los usuarios en la ciudad, y así orientar a los planificadores para la implementación de políticas que mejoren los índices de calidad urbana. Para ello, estos modelos deben ser calibrados según el comportamiento de la ciudad y las decisiones del ente planificador.

Abstract

The knowledge of certain indicators of urban quality allows to implement policies that will improve some of these, using models to predict the behavior of users in the city. Predicting this and having some open research lines, it is possible to set objective to develop methodologies for improvement.

To improve indicators of urban quality were used integrated equilibrium of land use and transport model with indicators such as congestion, travel times and spatial segregation according to income, with its own defined objective. With these objectives, were developed heuristics that improved indicators through concepts such as Wardrop's second principle, gradient methods and optimization with restrictions. The behavior of each of these heuristics was tested through various simulations.

The definition of these indicators obtained through the equilibrium in each stage, allowed to quantify the levels of congestion, time spent on the network and spatial segregation according to income, which throw certain reference level.

In the first heuristic, aimed at reducing the total time spent in the network, found results with time duration less than 10 minutes, as the structure that develops equilibrium integrated of land use and transport problem

The second heuristic developed, aimed to improve the network congestion levels, took about 15 hours to find the results. Meanwhile, the third heuristic, aimed to reducing spatial segregation according to income, took about 6 hours to find the result. Both were developed with a different structure of equilibrium integrated of land use and transport, because they incorporated a stage for calculating rates.

The three problems achieve the objective of reducing the indicator of urban quality, so that implementing the policies found it is possible to reach a equilibrium integrated of land use and transport with better indicators.

As a result, the proposed models allows to change the behavior of users in the city, and guide planners for the implementation of policies to improve the indicators of urban quality. For this, these models should be calibrated according to the behavior and decisions of city planning entity.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	III
Índice de Tablas	VI
Índice de figuras	VII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Estructura de la Tesis	2
2. Revisión Bibliográfica	4
2.1. Modelos de Uso de Suelo	4
2.2. Optimización de Uso de Suelo	6
2.2.1. Modelo Operativo de Planificación Óptima de Subsidios en Sistemas Urbanos	6
2.2.2. Uso de Suelo y Zonificación Óptima	7
2.3. Modelos de equilibrio en Transporte	7
2.4. Optimización del sistema de Transporte	8
2.5. Modelo Integrado de Uso de Suelo y Transporte sin Externalidades	9
2.6. Modelo Integrado de Uso de Suelo y Transporte con Externalidades	10
2.6.1. Generación de Viajes	11
2.6.2. Distribución y asignación a la red de los Viajes	11
2.6.3. Mecanismo de Localización y Proceso de Remate	11
2.7. Estrategias de Aseguramiento del Desarrollo Sustentable de la Ciudad	13
3. Definición de los problemas de optimización	15
3.1. Definición de objetivos sociales urbanos	15
3.2. Minimización de Tiempo total de la Red (TT)	16
3.3. Minimización del Índice de Congestión (IC)	17
3.4. Minimización de la Segregación Espacial (IS)	18
3.5. Comentarios del capítulo	19

TABLA DE CONTENIDO

4. Diseño y Desarrollo de OMITUS	20
4.1. OMITUS - TT	20
4.2. OMITUS - IC	22
4.3. OMITUS - IS	24
5. Simulaciones y Análisis de Resultados	27
5.1. Detalle de parámetros y ecuaciones utilizadas	27
5.2. Descripción de escenarios	30
5.3. Análisis de escenarios simulados	32
5.3.1. Escenario 1	32
5.3.2. Escenario 2	33
5.3.3. Escenario 3	34
5.3.4. Escenario 4	35
5.3.5. Escenario 5	36
5.3.6. Escenario 6	37
5.3.7. Escenario 7	38
5.3.8. Escenario 8	39
5.3.9. Escenario 9	40
5.4. Análisis de resultados	41
5.4.1. MITUS	41
5.4.2. OMITUS - TT	42
5.4.3. OMITUS - IC	44
5.4.4. OMITUS - IS	45
5.5. Resumen de resultados	47
6. Conclusiones y líneas futuras de investigación	49
6.1. Equilibrio integrado de uso de suelo y transporte	49
6.2. Políticas en transporte	50
6.3. Políticas en uso de suelo	50
6.4. Formulación y resolución de OMITUS	51
6.5. Líneas futuras de investigación	51
7. Anexos	53
7.1. Iteraciones OMITUS-IC	53
7.2. Tarifas encontradas para escenario 1	59
7.3. Tarifas encontradas para escenario 2	60
7.4. Tarifas encontradas para escenario 3	61
7.5. Tarifas encontradas para escenario 4	62
7.6. Tarifas encontradas para escenario 5	63
7.7. Tarifas encontradas para escenario 6	64
7.8. Tarifas encontradas para escenario 7	65
7.9. Tarifas encontradas para escenario 8	66
7.10. Tarifas encontradas para escenario 9	67

TABLA DE CONTENIDO

Bibliografía

68

Índice de Tablas

5.1. Niveles de ingreso	28
5.2. Parámetros	29
5.3. Parámetros de accesibilidad	29
5.4. Caracterización de Escenarios	30
5.5. Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 1	33
5.6. Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 2	34
5.7. Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 3	35
5.8. Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 4	36
5.9. Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 5	37
5.10. Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 6	38
5.11. Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 7	39
5.12. Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 8	40
5.13. Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 9	41
5.14. Índices en el equilibrio MITUS	42
5.15. Comparación índice TT	42
5.16. Comparación índice IC	44
5.17. Comparación índice IS	46
5.18. Resumen de resultados	48
7.1. Tarifas aplicadas para el Escenario 1	59
7.2. Tarifas aplicadas para el Escenario 2	60
7.3. Tarifas aplicadas para el Escenario 3	61
7.4. Tarifas aplicadas para el Escenario 4	62
7.5. Tarifas aplicadas para el Escenario 5	63
7.6. Tarifas aplicadas para el Escenario 6	64
7.7. Tarifas aplicadas para el Escenario 7	65
7.8. Tarifas aplicadas para el Escenario 8	66
7.9. Tarifas aplicadas para el Escenario 9	67

Índice de figuras

4.1. Esquema planteado para OMITUS TT	21
4.2. Esquema planteado para OMITUS IC	23
4.3. Esquema del algoritmo del problema IS	26
5.1. Estructura de la ciudad a modelar	32
5.2. Esc. 1 MITUS	33
5.3. Esc. 1 OMITUS-TT	33
5.4. Esc. 1 OMITUS-IC	33
5.5. Esc. 1 OMITUS-IS	33
5.6. Esc. 2 MITUS	34
5.7. Esc. 2 OMITUS-TT	34
5.8. Esc. 2 OMITUS-IC	34
5.9. Esc. 2 OMITUS-IS	34
5.10. Esc. 3 MITUS	35
5.11. Esc. 3 OMITUS-TT	35
5.12. Esc. 3 OMITUS-IC	35
5.13. Esc. 3 OMITUS-IS	35
5.14. Esc. 4 MITUS	36
5.15. Esc. 4 OMITUS-TT	36
5.16. Esc. 4 OMITUS-IC	36
5.17. Esc. 4 OMITUS-IS	36
5.18. Esc. 5 MITUS	37
5.19. Esc. 5 OMITUS-TT	37
5.20. Esc. 5 OMITUS-IC	37
5.21. Esc. 5 OMITUS-IS	37
5.22. Esc. 6 MITUS	38
5.23. Esc. 6 OMITUS-TT	38
5.24. Esc. 6 OMITUS-IC	38
5.25. Esc. 6 OMITUS-IS	38
5.26. Esc. 7 MITUS	39
5.27. Esc. 7 OMITUS-TT	39

ÍNDICE DE FIGURAS

5.28. Esc. 7 OMITUS-IC	39
5.29. Esc. 7 OMITUS-IS	39
5.30. Esc. 8 MITUS	40
5.31. Esc. 8 OMITUS-TT	40
5.32. Esc. 8 OMITUS-IC	40
5.33. Esc. 8 OMITUS-IS	40
5.34. Esc. 9 MITUS	41
5.35. Esc. 9 OMITUS-TT	41
5.36. Esc. 9 OMITUS-IC	41
5.37. Esc. 9 OMITUS-IS	41
5.38. Gráfico TT1	43
5.39. Gráfico TT2	43
5.40. Gráfico IC1	45
5.41. Gráfico IC2	45
5.42. Gráfico IS1	46
5.43. Gráfico IS2	47
5.44. Gráfico IS3	47
7.1. Escenario 1	53
7.2. Escenario 2	54
7.3. Escenario 3	54
7.4. Escenario 4	55
7.5. Escenario 5	55
7.6. Escenario 6	56
7.7. Escenario 7	56
7.8. Escenario 8	57
7.9. Escenario 9	57
7.10. Escenario 5	58

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Analizar políticas que mejoren la calidad del transporte de pasajeros en las ciudades es un tema ampliamente desarrollado en el ámbito de transporte (búsqueda de transporte público de calidad, mejora de infraestructura vial, políticas de tarificación), usualmente considerando el proceso de localización como parámetro exógeno. En esta tesis se estudiarán políticas integradas en transporte y uso de suelo buscando mejoras en ambos mercados. Para esto se utilizará como base modelos de equilibrio y se extenderán para buscar conjuntos de políticas de subsidio o tarifas en uso de suelo y transporte que mejoren uno o varios criterios sociales.

El problema del equilibrio urbano ha sido estudiado en varios trabajos previos, entre ellos Martínez (1992) con Bid-Choice, el cual integra los conceptos de economía urbana de remates de Alonso (1964) y de equilibrio Walrasiano (Anas, 1982), demostrando la equivalencia de ambos modelos. Esta base teórica se desarrolla en el modelo tipo logit RB&SM (Martínez y Henríquez, 2007) y se implementó en el modelo operativo MUSSA¹ (Martínez y Donoso, 2010). Por otra parte existen modelos que integran el uso de suelo y el sistema de transporte (LU&T) como los propuestos por Briceño et al. (2008) y Bravo et al. (2010), los cuales encuentran un equilibrio global basándose en el modelo RB&SM y en un modelo de transporte llamado Equilibrio Markoviano de Tráfico de Baillon y Cominetti (2006). Los modelos de Briceño et al. (2008) y Bravo et al. (2010) se diferencian en que el primero no considera externalidades en localización (efectos en el vecindario), mientras que el segundo si lo hace. El modelo integrado da origen al software MITUS², el cual tiene solución única y converge bajo ciertas condiciones.

Un problema urbano relacionado con el anterior es optimizar la localización de acuerdo a algún criterio de planificador, como lo hace Rossi-Hansberg (2004) que estudia la localización óptima tanto para los lugares de trabajo como de vivienda, con el fin de maximizar la renta del suelo, mientras que Verhoef y Nijkamp (2002) busca el equilibrio alcanzando obje-

¹MUSSA: Modelo de Uso de Suelo de Santiago.

²MITUS: Modelo Integrado de Transporte y Uso de Suelo.

tivos ambientales, considerando las economías de aglomeración en el proceso de localización. En ambos casos los autores consideran una ciudad circular monocéntrica y utilizan modelos determinísticos lo cual limitan su implementación. En cambio Águila (2006) bajo condiciones discretas y estocásticas desarrolla un modelo operativo de planificación óptima del uso de suelo que calcula los subsidios o impuestos que permiten maximizar el beneficio social bajo un estado de equilibrio según el modelo RB&SM. Este modelo solo analiza ese criterio y bajo el supuesto que el costo de transporte y los viajes son exógenos.

Basándose en el modelo de equilibrio global MITUS, en esta tesis se propone formular un modelo que encuentre políticas de uso de suelo (impuestos, subsidios y regulaciones) y de transporte (peajes, subsidios e inversiones en vialidad), que permitan mejorar un objetivo dado por el planificador; este modelo será llamado OMITUS³. El principal desafío teórico de la tesis proviene del gran número de opciones que tiene el planificador para encontrar un óptimo y la complejidad asociada al problema de equilibrio integrado de uso de suelo y transporte. La ventaja del modelo OMITUS es que permitirá simular políticas en los mercados de transporte y uso de suelo de forma simultánea, considerando el costo de transporte y las externalidades de localización endógenamente, así como los costos de inversión y mantención en infraestructura. Se utilizarán heurísticas ad-hoc para encontrar una solución que mejore cada objetivo, aunque sin garantizar que se alcance la solución óptima.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Desarrollar una herramienta que permita identificar un conjunto de políticas de subsidios y tarifas, aplicadas a la localización de actividades (uso de suelo) y al uso de vialidad urbana, de manera que se mejore un índice de calidad urbana definido por el planificador.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Definir un conjunto de índices de calidad urbana.
- Desarrollar heurísticas que permitan identificar políticas que mejoren dichos índices.
- Desarrollar programas computacionales para cada heurística y probar su comportamiento en ejemplos específicos.

1.3. Estructura de la Tesis

Se realizará una revisión bibliográfica, que considere los temas de equilibrio en uso de suelo, teoría de remates y optimización del uso de suelo, realizando un análisis crítico de

³Modelo de Optimización de Transporte y Uso de Suelo

estos temas. En particular se estudiará el modelo desarrollado por Águila (2006), ya que busca subsidios óptimos de localización eficiente alcanzando equilibrio. Se analizará con detalle el trabajo de Briceño et al. (2008) y de Bravo et al. (2010), considerando la modelación integrada del uso de suelo y transporte, lo cual será revisado en el capítulo 2.

En el capítulo 3 se estudiarán tres índices de calidad urbana: 1) minimizar los tiempos totales en la red mediante políticas de tarificación; 2) minimizar un índice de saturación de los arcos de la red; 3) minimizar un índice de segregación socioeconómica mediante subsidios o impuestos en el uso del suelo. Para esto se formularán problemas de mejora de cada índice y se diseñará una heurística para cada caso cumpliendo la condición de que el sistema de uso de suelo y transporte alcanza el equilibrio. Para cumplir esta condición se utilizará el modelo integrado de uso de suelo y transporte, implementado en MITUS, el cual modela el equilibrio que alcanzan diversos usuarios en un enfoque de espacio discreto con elecciones estocásticas, utilizando una red de transporte privado y considerando externalidades en localización y transporte. Dada la estructura del problema de equilibrio MITUS, las condiciones de equilibrio generan ecuaciones de punto fijo. En este contexto, las nuevas variables de política, precios, subsidios e impuestos, son parámetros en el modelo MITUS. El problema se estudiará como un sistema integrado de punto fijo (análogo a MITUS), donde las variables a mejorar son el conjunto de políticas que respetan el equilibrio MITUS. En base a ese análisis se definirá una heurística de optimización para cada índice que permita mejorar el objetivo planteado.

En el capítulo 4 se diseñarán e implementarán heurísticas para resolver los problemas definidos en OMITUS para cada índice, para continuar con el capítulo 5 donde se muestran los escenarios utilizados para las simulaciones. Además, se realiza la comparación de las distintas políticas analizadas. Finalmente en el capítulo 6 se describen algunas líneas futuras de investigación.

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

Este capítulo está dedicado al estudio del estado del arte de modelación de uso de suelo integrada con transporte, con el fin estudiar los modelos de equilibrio que se utilizarán en el problema de políticas óptimas.

Para esto estudiaremos modelos de uso de suelo, de transporte e integrados. Se considerarán únicamente modelos estáticos a largo plazo, y luego se realizarán análisis de modelos que implementan políticas en la búsqueda de ciudades eficientes. Por otra parte, considerando que la localización de uso de suelo depende de los niveles de congestión en la red de transporte, se estudian modelos de equilibrio de transporte y posibles mejoras para lograr equilibrios requeridos por el planificador.

2.1. Modelos de Uso de Suelo

La economía urbana se ha centrado en modelar el comportamiento de los usuarios al momento de elegir su localización. Alonso (1964) propuso que el suelo, al ser un bien cuasi-único, debe ser modelado como un proceso de remate donde el suelo se asigna al mejor postor (*teoría bid-rent*). Por otro lado, la teoría de elección discreta (*discrete-choice*) planteada por McFadden (1978), considera a los usuarios como maximizadores de su utilidad, por lo que buscan su mejor localización según la utilidad que le reportan las distintas opciones. En Martínez (1992) se demuestra que ambos enfoques son equivalente cuando se considera competencia perfecta, dando origen a la teoría del Bid-Choice.

Siguiendo esta teoría, Martínez y Henríquez (2007) plantearon un modelo de equilibrio estático que considera externalidades en el proceso de localización, usuarios con un comportamiento aleatorio que se ve reflejado en su disposición a pagar, y productores de suelo modelados como maximizadores de su ganancia privada (Martínez y Roy, 2004). Este modelo, denominando RB&SM¹, se resuelve a través de ecuaciones de punto fijo.

El modelo RB&SM busca el equilibrio en la localización de los usuarios y simultáneamente fija las posturas, las externalidades y la oferta. Para cuantificar la disposición a pagar

¹Random Bidding and Supply Model Martínez y Henríquez (2007)

de los usuarios, esta se supone de la forma $B_{hi} = b_h^1 + b_{hi}^2((P_{h/i}), (S_i)) + b^3$, donde h es el índice que indica el tipo de hogar, i es el índice que indica la zona de localización, b_h^1 ajusta el nivel de utilidad del hogar tipo h , b_{hi}^2 describe los atributos percibidos por hogares h de las propiedades ubicadas en i en función de la probabilidad ($P_{h/i}$) y en la cantidad de viviendas (S_i) a ocuparse, ambas variables endógenas, y por último b^3 es un término constante que ajusta las posturas a niveles de referencia en todo el mercado. Para incluir variabilidad en la decisión de los hogares se incluye un término de error, por lo que la función de postura aleatoria $\tilde{B}_{hi} = B_{hi} + \epsilon_{hi}$, donde ϵ_{hi} son términos aleatorios que se asumen iid² Gumbel, con lo que se llega a que la probabilidad de la localización tiene la forma Logit.

Las ecuaciones

$$P_{h/i} = P_{h/i}((b_h^1), (P_{h/i}), (S_i)) \quad \forall h, i \quad (2.1)$$

$$S_i = S \cdot P_i((b_h^1), (P_{h/i}), (S_i)) \quad \forall i \quad (2.2)$$

$$b_h^1 = b_h((b_h^1), (P_{h/i}), (S_i)) \quad \forall h, \quad (2.3)$$

corresponde a los puntos fijos que deben ser resueltos para alcanzar el equilibrio donde la ecuación (2.1) representa la localización, (2.2) representa la oferta y (2.3) ajusta el nivel de utilidad.

Debido a la forma funcional de la disposición a pagar, el punto fijo de la localización, que depende de la disposición a pagar, queda escrito por,

$$P_{h/i} = \frac{\bar{H}_h \exp(\mu \cdot B_{hi})}{\sum_g \bar{H}_g \exp(\mu \cdot B_{gi})} \quad (2.4)$$

en (2.4) aparece el punto fijo de la localización.

Donde:

- μ : Factor de escala de la distribución Gumbel.
- \bar{H}_h : Es el número de hogares del tipo h , parámetro exógeno del modelo.

La forma de calcular la renta del suelo es a partir de la máxima postura esperada. Esto se realiza a través de la función log-suma, que representada en una distribución Gumbel iid el valor máximo esperado de las posturas. Se muestra en (2.5) la forma de la ecuación,

$$r_i = \frac{1}{\mu} \ln \left(\sum_g \bar{H}_g \exp(\mu B_{gi}) \right) + \frac{\gamma}{\mu}, \quad (2.5)$$

donde γ es la constante de Euler y μ es el factor de escala de la distribución Gumbel, la cual es inversamente proporcional a la varianza de las posturas.

²Idénticamente independiente distribuidas

La forma de modelar la oferta se realiza a través de una maximización de la ganancia privada, asumiendo que las utilidades se distribuyen iid y se utiliza un parámetro de escala λ el cual es inversamente proporcional a la varianza de la ganancia privada. Con estos supuestos se llega que el número de viviendas que se localizan en i está dada por:

$$S_i = S \cdot P_i = S \cdot \sum_j P_{ij} = S \cdot \sum_j \frac{\exp(\lambda \cdot \tilde{\pi}_{ij} - \rho_j)}{\sum_{i'j'} \exp(\lambda \cdot \tilde{\pi}_{i'j'} - \rho'_j)}, \quad (2.6)$$

donde ρ_j es un parámetro que ajusta a la partición de mercado al oferente j y $\tilde{\pi}_{ij}$ es el resultado de la maximización de la ganancia privada ajustado a las regulaciones y restricciones del modelo el cual incluye al oferente j y el tipo de hogar i . Con esto es posible encontrar el punto fijo de la ecuación (2.2) que representa la oferta de uso de suelo por parte de los productores.

El modelo RB&SM sirve de base para los modelos integrados de uso de suelo y transporte que serán revisados a continuación, es por esto que se realiza una descripción detallada del modelo.

2.2. Optimización de Uso de Suelo

En esta sección se dan a conocer modelos que buscan optimizar distintas funciones objetivos teniendo en cuenta un equilibrio en el uso de suelo. Primero se revisará el modelo utilizado por Águila (2006) llamado Modelo Operativo de Planificación Óptima de Subsidios en Sistemas Urbanos y luego el modelo de Uso de Suelo y Zonificación Óptima planteado por Rossi-Hansberg (2004).

2.2.1. Modelo Operativo de Planificación Óptima de Subsidios en Sistemas Urbanos

En Águila (2006) se formula un problema de optimización de uso de suelo basado en el modelo de equilibrio RB&SM (Martínez y Henríquez, 2007) el que, dado un conjunto de regulaciones, permite obtener políticas óptimas de subsidios y precios sombra de las regulaciones para obtener el objetivo planteado por el planificador. Para lograr esto, se generan dos herramientas alternativas que permiten obtener tales resultados.

- Modelo de subsidio óptimo (RB&SOSPM) es utilizado para la generación de resultados preliminares de aplicabilidad y tendencias a partir de un prototipo, mostrando que la localización óptima tiende a la concentración de la oferta.
- Modelo de localización óptima (OULM) basado en la teoría de remates y es utilizado para probar que las externalidades de localización generan ineficiencias y que los subsidios óptimos cumplen el rol de corregir externalidades, regulaciones y costos de producción.

Ambos modelos están relacionados ya que buscan maximizar la función de beneficio agregado neto (BAN) mostrada en 2.7 donde S_i es la oferta de uso de suelo, r_i es la renta del suelo localizado en la zona i , c_i es el costo del suelo localizado en la zona i , H_{hi} es el número de hogares tipo h que se localizan en la zona i y t_{hi} es el monto subsidiado o cobrado por el planificador asociado al hogar tipo h , para la zona i .

$$BAN = - \sum_h H_h b_h(t) + \sum_i S_i(t)[r_i(t) - c_i(t)] - \sum_{hi} H_{hi}(t) \cdot t_{hi} \quad (2.7)$$

Este trabajo concluye en que ambos métodos producen los mismos resultados, pero poseen distinto enfoque y complejidad con un número de variables similares. Respecto al enfoque la diferencia más relevante es que RB&SOSPM considera oferentes maximizadores de ganancia, mientras OULM no asume ningún tipo de comportamiento. Entre ambos modelos OULM es el menos complejo y es aplicable a un rango más amplio de condiciones que RB&SOSPM.

2.2.2. Uso de Suelo y Zonificación Óptima

Rossi-Hansberg (2004) realiza una optimización de la localización considerando la maximización de la producción de la red en el consumo total de suelo. Esta teoría determina que la distribución del uso de suelo con fines de trabajo, residenciales o bien en conjunto, dependen del costo en transporte y de las externalidades del uso de suelo. Para esto analizan los efectos de los cambios en localización en el costo del transporte y los parámetros de externalidades. Se propone un modelo de ciudad circular, donde el suelo puede tener uso habitacional o de trabajo, por lo que las personas consumen bienes y suelo residencial. Al localizar las firmas se inducen externalidades que afectan a los usuarios de viviendas. Se plantea una función de utilidad de los individuos que depende de los bienes y de las unidades de suelo utilizadas. Con este modelo el autor concluye que cuando los costos de transporte son bajos, el centro de la ciudad es usado con fines laborales, mientras que el resto tiene fines residenciales. Cuando se incrementan los costos de transporte se obtienen bajas densidades de empleos en el centro de la ciudad, y si se incrementan aún más, el centro es usado con fines habitacionales, rodeado por un anillo con fines laborales y por el exterior un anillo con fines residenciales.

2.3. Modelos de equilibrio en Transporte

Estos modelos describen el efecto de la demanda en la congestión de la red y determinan la etapa de asignación de los flujos a la red. De acuerdo con el principio de Wardrop, los usuarios se comportan de forma racional eligiendo la ruta de menor costo (tiempo) y la congestión es creciente con respecto al incremento del flujo en cada arco. Estos modelos pueden ser determinísticos o bien estocásticos. En el primer caso se supone que todos los usuarios perciben el costo de la misma forma, mientras que en el segundo caso se supone que

los usuarios perciben de distinta forma los costos entre un par OD³.

El modelo MTE⁴ (Baillon y Cominetti, 2006), busca el equilibrio en redes basado en la programación dinámica estocástica. En éste, los pasajeros se mueven hacia su destino a través de un proceso secuencial de selección de arcos basado en la elección discreta de cada nodo intermedio en su viaje. La selección de ruta es el resultado de un proceso secuencial, mientras que los flujos en la red corresponden a las medidas invariantes de las cadenas de Markov subyacentes. Este enfoque permite diferentes tipos de modelos de elección discreta, incluyendo la posibilidad de mezclar modelos con reglas determinísticas o estocásticas. De esta forma, es posible usarlo sobre una red multimodal para modelar la selección simultánea de modo y ruta. Incluso es posible incorporar demanda elástica en el proceso de equilibrio. Se establece la existencia de un único equilibrio, caracterizado como la solución de un problema de minimización convexa irrestricto de pequeñas dimensiones. Se realizan experimentos numéricos en redes pequeñas y grandes utilizando los algoritmos Newton y MSA. Solo se demuestra formalmente la convergencia para el caso del MSA.

2.4. Optimización del sistema de Transporte

Para realizar alguna mejora en el sistema de transporte, es necesario definir algún criterio de mejora, como la minimización del tiempo total de los usuarios de la red, tal como se muestra a continuación realizado en la página 69 de Sheffi (1984).

$$\begin{aligned}
 \text{mín}_{\omega_a} \quad & \tilde{z}(\omega) = \sum_a \omega_a \cdot t_a(\omega_a) \\
 \text{s.a.} \quad & \sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \\
 & f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \\
 & \omega_a = \sum_{krs} f_k^{rs} \cdot \delta_{ak}^r \quad \forall a
 \end{aligned}$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 \omega_a & : \text{flujo en el arco } a \\
 f_k^{rs} & : \text{flujo en la ruta } k, \text{ con origen } r \text{ y destino } s \\
 t_a & : \text{tiempo requerido para recorrer el arco } a \text{ para el flujo } \omega_a \\
 q_{rs} & : \text{flujo total desde el nodo } r \text{ hasta el nodo } s \\
 \delta_{ak}^r & : \begin{cases} 1, & \text{si la ruta } k \text{ incluye el arco } a \\ 0, & \sim \end{cases}
 \end{aligned}$$

³OD: Abreviación a un par origen destino

⁴Markovian Traffic Equilibrium, Equilibrio Markoviano de Tráfico

La solución de este problema determina el conjunto de flujos en los arcos (ω_a) con lo cual es posible determinar el tiempo de viaje de cada uno de ellos ($t_a(\omega_a)$). De esta solución es posible determinar que en el caso que se aplique una tarifa en los arcos incluyendo el tiempo marginal percibido por los usuarios se encuentra el mínimo tiempo total de la red, para estos casos el tiempo por arco esta dada por $\tilde{t}_a(\omega_a) = t_a(\omega_a) + \omega_a \cdot \frac{dt_a(\omega_a)}{d\omega_a}$, donde: el primer componente es el tiempo que percibe el usuario directamente como su consumo de tiempo, mientras que la segunda es la contribución marginal del tiempo que perciben los otros usuarios. En el transporte privado con congestión esta contribución es positiva, es decir el incremento de otros usuarios conlleva a un mayor tiempo marginal para todos los usuarios. La tarificación por congestión busca que la externalidad producida por unos usuarios hacia otros usuarios sea percibida a través de una tarifa según el segundo término del tiempo marginal ($\omega_a \cdot \frac{dt_a(\omega_a)}{d\omega_a}$).

Otras optimizaciones en el ámbito del transporte como la disminución de la congestión, depende de la capacidad de los arcos y puede ser una maximización de la rentabilidad en las vías privadas, o bien cubrir costos de éstas. Según, lo visto, existen varios objetivos posibles por cumplir, por lo que es importante definir cual es el objetivo y diseñar la política para alcanzarlo.

2.5. Modelo Integrado de Uso de Suelo y Transporte sin Externalidades

El modelo integrado de uso de suelo y transporte propuesto por Briceño et al. (2008) define un problema relevante para el campo de las decisiones de políticas a largo plazo, y busca un equilibrio entre las interacciones de transporte y del uso de suelo.

El equilibrio es caracterizado como el mínimo del siguiente problema de optimización irrestricto, estrictamente convexo y coercivo:

$$\min_{t,b,r} \phi(t, r, b) = \underbrace{\sum_{a \in A} \int_0^{t_a} s_a^{-1}(z) dz}_I + \underbrace{\sum_{h \in C} H_h b_h + \sum_{i \in I} S_i \cdot r_i}_{II} + \underbrace{\frac{1}{\mu} \sum_{\substack{h \in C \\ i \in I}} e^{\mu(B_{hi}(b_h, t) - r_i)}}_{III} \quad (2.8)$$

donde $s_a(t_a)$ es la función de costo en el arco a , H_h es el número de hogares del tipo h , b_h es la medida de la utilidad de los hogares tipo h que se obtiene del equilibrio, S_i (exógeno) es el número de viviendas ofertadas en la zona i , r_i es la renta de la zona i , B_{hi} es la disposición a pagar por localizarse en la zona i para el hogar tipo h , la cual depende de la utilidad y de los tiempos de viaje (t), μ es un parámetro inversamente proporcional a la dispersión de las variables $B_{hi} - r_i$. La ecuación (2.8) reproduce las ecuaciones de equilibrio tanto de RB&SM de Martínez y Henríquez (2007) como del MTE de Baillon y Cominetti (2006), lo que representa un modelo de equilibrio integrado de uso de suelo y transporte.

El problema en (2.8) es posible descomponerlo en tres partes, donde (I) depende de las variables del tiempo de viaje, (II) depende de las variables de uso de suelo y, finalmente,

(III) depende tanto de variables del tiempo de viaje y de uso de suelo. Esta última componente permite combinar los dos mercados.

El modelo fue probado a través de simulaciones para obtener el equilibrio entre uso de suelo y transporte. Para estas simulaciones se consideró la ciudad de Sioux Falls, la cual tiene 24 nodos y 76 arcos, probando la convergencia y analizando el comportamiento del modelo.

El modelo de Briceño et al. (2008) no incorpora externalidades en la localización, mientras que Bravo et al. (2010) integra transporte con uso de suelo considerando las externalidades de localización el cual es revisado a continuación.

2.6. Modelo Integrado de Uso de Suelo y Transporte con Externalidades

Bravo et al. (2010), analizan como los individuos deciden localizarse tomando en cuenta la congestión de la red y las externalidades de localización, considerando propósitos de viajes múltiples. Al igual que en Briceño et al. (2008) solo se consideran al transporte privado. Este problema es tratado como un equilibrio estático en el largo plazo donde la localización, decisiones de viajes y la elección de ruta, están representados por modelos logit entrópicos. En este enfoque, el consumidor optimiza la combinación entre transporte y localización en una sub-red que representa opciones del uso de suelo y demanda de transporte. Se propone un modelo estático de equilibrio que considera la congestión y externalidades de localización, y se incluyen las elecciones de destino, basados en la atracción de uso de suelo como características endógenas de los barrios. El modelo se resuelve a través de un problema de puntos fijos estableciendo las condiciones de existencia del equilibrio y entregando las condiciones de unicidad y convergencia de los puntos fijos planteados.

Este modelo se revisa en detalle porque da origen al modelo MITUS que se utiliza en esa tesis. Se estructura en varias etapas, generación, distribución y asignación a la red, y localización. El problema se resuelve a través de un sistema de puntos fijos que se detallará más adelante, en donde la estructura que compone al modelo está dado en la secuencia de cálculo iterativo 2.9

$$(H_{hi}) \longrightarrow O_i^h \longrightarrow (t, \alpha) \longrightarrow B_{hi} \longrightarrow (H_{hi}) \quad (2.9)$$

Esta secuencia indica que cada iteración comienza con una localización (H_{hi}) , luego se calcula la generación de viajes (O_{hi}) , luego sigue con el cálculo del equilibrio de transporte expresado por (t, α) , posteriormente se realiza el cálculo de las posturas por localización (B_{hi}) y finalmente se calcula la nueva localización. Esta secuencia se itera hasta encontrar el equilibrio tanto de localización como de transporte, lo cual está garantizado por un teorema de convergencia para ciertos valores de dispersión (ver Bravo et al. (2010)).

2.6.1. Generacion de Viajes

Está dada por el número de viajes generados por cada cluster de hogares h en cada zona i durante el periodo de tiempo que se modela

$$O_{hi} = N_{hi}H_{hi} + \delta_{hi}, \quad (2.10)$$

donde la tasa de generación de viajes es N_{hi} y δ_{hi} es un término positivo.

2.6.2. Distribución y asignación a la red de los Viajes

El equilibrio de distribución y asignación a la red se formula a través del problema de optimización

$$\min_{\alpha, t} \phi(\alpha, t) = \sum_{a \in A} \int_{t_a^0}^{t_a} s_a^{-1}(z) dz + \sum_{h \in C} \sum_{i \in I} O_{hi} \alpha_{hi} + \sum_{h \in C} \frac{1}{\mu_h} \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \exp[-\mu_h (c_i^{dh}(t, H) + \alpha_{hi})], \quad (2.11)$$

donde $c_i^{dh} = \tau_i^{dh}(t) - \gamma_d(H)$, $\tau_i^{dh}(t)$ es el tiempo esperado de viaje obtenido mediante la resolución del sistema de ecuaciones $\tau_i^{dh} = \varphi_i^{dh}(t_a + \tau_{j_a}^{dh} : a \in A_i^+) \forall i \in N$, donde A_i^+ es el conjunto de arcos donde el nodo antecesor al arco a es el i y j_a denota el nodo sucesor del arco a ; $\varphi(\cdot)$ está caracterizado por el modelo de elección discreta. $\gamma_d(H)$ representa la externalidad de localización dada por la atracción de viajes al destino d , la cual es función dada de la matriz de localización H .

La solución de este problema de optimización reproduce las condiciones del modelo MTE, en donde α_{hi} es expresado por

$$\alpha_{hi} = \frac{1}{\mu_h} \ln \left(\frac{1}{O_{hi}} \sum_{d \in D} \exp[-\mu_h (\tau_i^{dh}(t) - \gamma_d(H))] \right). \quad (2.12)$$

Bajo esta formulación, el problema (2.11) es resuelto de forma integrada en generación y asignación de viajes donde se obtiene (α, t) .

2.6.3. Mecanismo de Localización y Proceso de Remate

Para este proceso se asume que el error de las posturas se distribuye Gumbel (iid), por lo que la probabilidad de que el agente h se localice en i , está dado por lo siguiente:

$$P_{h/i} = \frac{\exp(\theta_i B_{hi})}{\sum_{g \in C} \exp(\theta_i B_{gi})}, \quad (2.13)$$

$B_{hi} = u_{hi}^e(H, O, \alpha, t) - b_h^u$, el primer término capta la externalidad de la localización mientras que el segundo término capta la desutilidad del hogar h al localizarse, u_{hi}^e será explicado más adelante, el cual se obtiene del problema de optimización:

$$\min_{b^u} \Gamma(b^u) = \sum_{h \in C} H_h b_h^u + \frac{1}{\theta_i} \sum_{i \in I} S_i \ln \left(\sum_{h \in C} \exp[\theta_i (B_{hi})] \right) \quad (2.14)$$

Se considera la disposición a pagar $B_{hi}(H, O, t, \alpha) = u_{hi}^e - b_h^u$ en los problemas que ya han sido encontrados. u_{hi}^e es la valoración de los atributos de la zona i y b_h^u , es el término de ajuste para alcanzar el equilibrio, representando el nivel de utilidad del hogar $h \in H$. Con la disposición a pagar paramétrica en el problema en las etapas anteriores, se construye la localización de forma logit, según RB&SM de Martínez y Henríquez (2007), que queda como:

$$H_{hi} = S_i \cdot \frac{\exp(\theta_i \cdot B_{hi})}{\sum_g \exp(\theta_i \cdot B_{gi})}, \quad (2.15)$$

La componente de la utilidad b_h^u se obtiene resolviendo el siguiente punto fijo;

$$b_h^u = -\frac{1}{\mu} \ln \left(\frac{1}{H_h} \sum_{i \in I} S_i \cdot \frac{\exp(\mu u_{hi}^e)}{\sum_r \exp(\mu b_{ri})} \right) \quad (2.16)$$

con una iteración del tipo $b_h^{k+1} = f(b_h^k)$, donde $b_h^1 = 0$.

Considerando que todos los agentes se localizan, es decir $\sum_{i \in I} H_{hi} = H_h$, se resuelve el problema y se demuestra que tiene solución y esta es única.

El modelo integrado de uso de suelo y transporte es formulado a través de un sistema de punto fijo, que conecta las tres etapas previas señaladas.

Para una localización dada $H \in K$, donde K es un politopo no vacío convexo y compacto y teniendo $\Theta(\cdot)$ una composición de mapas continuos. Se define una matriz $O = \Psi_1(H)$ a través de (2.10). El par (H, O) determina el vector de variables de accesibilidad (α, t) a través del mapa Ψ_2 que es el resultado del problema (2.11). Finalmente la tupla (H, O, α, t) determina un único B y la matriz de localización \tilde{H} a través del mapa Ψ_3 que resuelve el punto fijo (2.13). De este modo \tilde{H} es una función de H ; que está dada por $\Theta : K \rightarrow K$ donde $\Theta(H) = \Psi_3(H, \Psi_1(H), \Psi_2(H, \Psi_1(H)))$, se llega finalmente a $\tilde{H} = \Theta(H)$.

Las ecuaciones de punto fijo que gobiernan el problema están divididas en 4 etapas las cuales se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$1 \quad O_{hi} = N_{hi}H_{hi} + \delta_{hi} \quad \forall i \in I, h \in C \quad (2.17)$$

$$2a \quad t_a = s_a(w_a) \quad \forall a \in A \quad (2.18)$$

$$w_a = \sum_{d \in D, h \in C} v_a^{dh} \quad \forall a \in A \quad (2.19)$$

$$v_a^{dh} = \sum_{i \in I} g_i^{dh} \frac{\partial \tau_i^{dh}}{\partial t_a}(t) \quad \forall a \in A, d \in D, h \in C \quad (2.20)$$

$$2b \quad g_i^{dh} = \exp[-\mu_h(\tau_i^{dh}(t) - \gamma_d(H) - \alpha_{hi}(t))] \quad \forall i \in I, d \in D, h \in C \quad (2.21)$$

$$\sum_{d \in D} g_i^{dh} = O_{hi} \quad \forall i \in I, h \in C \quad (2.22)$$

$$3 \quad B_{hi} = u_{hi}^e(H, O, \alpha, t) - b_h^u \quad \forall i \in I, h \in C \quad (2.23)$$

$$4 \quad H_{hi} = S_i \frac{\exp(\theta_i B_{hi})}{\sum_{g \in C} \exp(\theta_i B_{gi})} \quad \forall i \in I, h \in C \quad (2.24)$$

$$\sum_{i \in I} H_{hi} = H_h \quad \forall h \in C \quad (2.25)$$

Considerando los supuestos planteados por Bravo et al. (2010) como φ_i^{dh} de clase C^3 , $s_a(\cdot)$ continua y estrictamente creciente con $\varphi_i^{dh}(t^0) > 0$ para todo $i \neq d$, $\sum_{i \in I} S_i = \sum_{h \in H} H_h$, $b_1^u = 0$ y con $\theta_i \in (0, \theta_c)$ donde existe $\theta_c > 0$ tal que permite tener el mapa $H \rightarrow \Theta(H)$ como una contracción de K . Se determina que existe un equilibrio único integrado de transporte y uso de suelo el cual se computa a través de los puntos fijos mostrados en las ecuaciones anteriores (2.17 - 2.25).

2.7. Estrategias de Aseguramiento del Desarrollo Sustentable de la Ciudad

El trabajo de Ma y Lo (2012) desarrolla un programa de optimización matemática con restricciones de equilibrio con el fin de estudiar el impacto de la oferta de transporte y el manejo de la demanda⁵. Los autores plantean que es crucial la realización de una estrategia integrada para lograr el desarrollo sustentable, ya que algún cambio en TS-DM no sólo produce un cambio en el transporte, sino que afecta la localización y por ende el valor del suelo. El modelo que se considera tiene características de un logit multinomial anidado, que combina la elección de viajes con la localización a través del proceso de bid-rent.

Este desarrolla una estructura de trabajo para políticas TS-DM útiles, tanto para el sistema de transporte como para el uso de suelo utilizando la optimización de un problema equivalente no lineal para resolver diferentes objetivos.

⁵transport supply and demand management (TS-DM)

2.7. Estrategias de Aseguramiento del Desarrollo Sustentable de la Ciudad

Los resultados encontrados, muestran que la interacción entre el valor del suelo y transporte mejoran, tomando en cuenta parámetros supuestos que han sido reportados en la literatura, pero que no han sido calibrados para la obtención de resultados.

Capítulo 3

Definición de los problemas de optimización

MITUS encuentra equilibrio único de transporte y uso de suelo dependiente de ciertos parámetros exógenos. El objetivo de este capítulo es definir métodos para identificar parámetros, subsidios o impuestos, que al ser utilizados como escenarios de MITUS induzcan un equilibrio que mejore indicadores planteados. En éste capítulo se realizará una definición de los distintos índices propuestos los que serán optimizados a través de heurísticas en el Capítulo 4.

3.1. Definición de objetivos sociales urbanos

El modelo MITUS permite calcular el equilibrio integrado para la localización y el transporte en una ciudad. Para lograr esto, se utiliza el modelo de equilibrio propuesto por Bravo et al. (2010) que incluye externalidades.

Como fue tratado en el Capítulo 2, la resolución del modelo integrado de uso de suelo y transporte, se realiza a través de un encadenamiento de todas las etapas del modelo, lo que permite encontrar la solución única vía un problema de punto fijo.

Basado en este modelo se estudian tres objetivos potenciales para una ciudad, los que interesan por abordar problemas que representan variedades distintas de objetivos en cuanto a su resolución matemática.

1. Minimización del tiempo total de la red.
2. Minimización de la congestión de los arcos.
3. Minimización de la segregación espacial dada por la diferencia de ingreso medio de cada zona.

Para el primer objetivo se buscará minimizar el tiempo total en la red (TT) expresado en la ecuación (3.1),

3.2. Minimización de Tiempo total de la Red (TT)

$$TT = \sum_a \omega_a \cdot s_a(\omega_a), \quad (3.1)$$

donde s_a es el tiempo medio de viaje por el arco a y ω_a es el flujo que circula por el arco a . Este objetivo alude al segundo principio de Wardrop pero en este caso el uso de suelo es variable, es decir, que los tiempos de viaje afectan la localización de las actividades.

Respecto del segundo objetivo, para medir la congestión provocada por el transporte privado, se define un índice de congestión que considera el flujo que circula por el arco ω_a , la capacidad del arco c_a , y queda definida por (3.2), en donde se busca minimizar el índice sumado en todos los arcos expresado en la ecuación (3.3).

$$IC_a = \frac{\omega_a}{c_a} \quad (3.2)$$

$$IC = \sum_a IC_a = \sum_a \frac{\omega_a}{c_a}. \quad (3.3)$$

El tercer objetivo buscará minimizar el índice de segregación (IS) expresado en la ecuación (3.4).

$$IS = \sum_i IS_i = \sum_i \left(\frac{\sum_h H_{hi} \cdot I_h}{H_i} - \bar{I} \right)^2, \quad (3.4)$$

donde I_h es el ingreso del hogar tipo h , H_{hi} es la cantidad de hogares localizados en i del tipo de hogar h .

Cada uno de los modelos se resuelve de forma separada aplicando una heurística diferente para cada uno de los casos, los cuales serán revisados.

3.2. Minimización de Tiempo total de la Red (TT)

Tomando en cuenta los largos tiempos de transporte para recorrer diariamente la ciudad a distintos destinos, se propone realizar una minimización del tiempo total (TT) utilizado por los usuarios de acuerdo con el segundo principio de Wardrop. Ese principio plantea que es posible llegar al óptimo que minimiza TT a través de una tarifa que internalice el tiempo marginal de los otros usuarios.

El objetivo de minimizar el tiempo total de viaje en la red se define como:

$$\begin{aligned} \min_{p_a} TT &= \sum_a \omega_a(p) \cdot s_a(\omega_a(p)) \\ \text{s.a.} & \\ &\text{Equilibrio MITUS (eqs: 2.17 - 2.25)} \end{aligned} \quad (3.5)$$

3.3. Minimización del Índice de Congestión (IC)

donde la función de costo percibida por los usuarios en MITUS es del tipo BPR y se muestra en la ecuación (3.6).

$$s_a(\omega_a) = t_a^0 \left(1 + b_a \left(\frac{\omega_a}{c_a} \right)^{e_a} \right) + p_a \quad (3.6)$$

con ω_a el flujo que circula por el arco a , c_a la capacidad del arco a , b_a y e_a son parámetros de la BPR.

El problema será abordado utilizando la metodología que consiste en resolver los mismos puntos fijos de MITUS, salvo que los usuarios en vez de percibir el costo medio del tiempo de viaje s_a percibirán el costo marginal para lo cual se introduce una tarifa a aplicar en cada arco $p = (p_a)_{a \in A}$, que modifica los tiempos medios para que representen los tiempos marginales; lo que está inspirado en el argumento del segundo principio de Wardrop. Los resultados serán analizados de forma de comprobar los resultados del objetivo cuando la localización es endógena.

Este esquema muestra que al término de la asignación de equilibrio del modelo de transporte se calculan tarifas que corresponden a la diferencia entre tiempo medio (percibido) y tiempo marginal, lo cual internaliza los costos de congestión en las decisiones de los usuarios. Estas tarifas se aplican a la próxima iteración global.

3.3. Minimización del Índice de Congestión (IC)

El objetivo de esta sección es minimizar el IC definido en (3.3). Para esto, se modificará el problema de equilibrio inicial planteado por Bravo et al. (2010) haciéndolo depender de ciertos parámetros $(p_a)_{a \in A}$ que representarán subsidios o tarifas por arco.

El modelo MITUS representado en (2.9), será utilizado como base en la modelación de OMITUS-IC el que se expresará como una sucesión de sub-modelos, similar a MITUS, pero donde se buscarán las políticas del tipo tarifa o subsidio que logran mejoras en el objetivo planteado, como se muestra en la figura 3.10.

El problema queda expresado

$$\begin{aligned} & \underset{p_a}{\text{mín}} \sum_{a \in A} \frac{\omega_a(p)}{c_a} \\ & \text{s.a.} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Equilibrio MITUS (eqs: 2.17 - 2.25),

donde ω_a respeta el equilibrio MITUS al encontrar los resultados, donde p_a es la tarifa o subsidio por circular en un arco producto a la congestión del arco. Dos casos que pueden ser tomados por esta política de tarificación.

$$\begin{aligned} p_a > 0 & \rightarrow \text{impuesto} \\ p_a < 0 & \rightarrow \text{subsidio} \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.4. Minimización de la Segregación Espacial (IS)

La tarifa p_a es incorporada al tiempo esperado de viaje $\tau_i^{dh} = \varphi_i^{dh} (t_a + \tau_{j_a}^{dh} + p_a)$, de forma equivalente a (3.6) y como se muestra a continuación.

$$s_a(\omega_a) = t_a^0 \left(1 + b_a \left(\frac{\omega_a}{c_a} \right)^{e_a} \right) + p_a \quad (3.9)$$

de manera que p_a está medida en las mismas unidades que t_a .

Se muestra en la siguiente figura de forma resumida la heurística utilizada para resolver el problema, la cual está compuesta por varias etapas, comenzando con la localización inicial, para continuar con el cálculo del vector de generación de viajes con esto obtener el equilibrio en transporte, con lo cual es posible calcular los valores de p_a y las posturas, para finalizar el proceso con el cálculo de la localización final de la iteración. Esta heurística será explicada en detalle en el siguiente capítulo siguiendo la lógica del siguiente esquema.

$$(H_{hi}) \longrightarrow O_i^h \longrightarrow (t, \alpha) \longrightarrow p_a \longrightarrow B_{hi} \longrightarrow (H_{hi}) \quad (3.10)$$

Dado que MITUS encuentra el estado de equilibrio y con esto encuentra los flujos ω_a , se redefinirán los flujos como la variable auxiliar G_a , equivalente al cálculo de (2.19), pero a diferencia de ω_a , no está en el equilibrio de MITUS, ya que se han modificado el tiempo esperado de viaje τ_i^{dh} con la inclusión de p_a .

3.4. Minimización de la Segregación Espacial (IS)

El objetivo de este modelo es disminuir la segregación espacial producto de la diferencia de ingreso que existe en la ciudad. Para medir la diferencia de ingreso se usa el índice de segregación, que se calculará mediante la diferencia de ingreso existente en cada nodo, respecto al ingreso promedio en la ciudad

El índice de segregación está definido en 3.4 y el problema que se requiere resolver se muestra a continuación donde T representa el total del subsidio que está dispuesto el planificador a entregar.

$$\begin{aligned} & \min_{q_{hi}} \sum_i \left(\frac{\sum_h H_{hi}(q) \cdot I_h}{H_i} - \bar{I} \right)^2 \\ & \text{s.a.} \\ & \sum_h \sum_i q_{hi} \cdot H_{hi} = T \\ & \text{Equilibrio MITUS (eqs: 2.17 - 2.25)} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Para la resolución de este problema se utiliza MITUS como base y se modifica la función de postura agregando los subsidios o impuestos (q_{hi}) en la localización para un hogar h en la zona i . La función de postura modificada proviene de (2.23) y se expresa como;

$$B_{hi} = u_{hi}^e - b_h^u + q_{hi} \quad (3.12)$$

que es utilizada para el cálculo de la probabilidad de localización logit (2.24). Para efectos de nuestro problema se define la variable auxiliar de localización J_{hi} a continuación.

$$J_{hi} = S_i \cdot P_{h/i} = S_i \cdot \frac{\exp[\theta_i(B_{hi})]}{\sum_{g \in C} \exp[\theta_i(B_{gi})]} = S_i \cdot \frac{\exp[\theta_i(u_{hi}^e - b_h^u + q_{hi})]}{\sum_{g \in C} \exp[\theta_i(u_{gi}^e - b_g^u + q_{gi})]}. \quad (3.13)$$

Para poder abordar el problema (3.11) y mejorar el IS se utiliza una serie de pasos comenzando por una localización inicial, para luego calcular el vector de generación de viajes, con esto obtener la dupla de transporte luego de esto las posturas B_{hi} para continuar con las tarifas de localización, con lo que finalmente se obtiene la localización de la iteración global, como se muestra a continuación.

$$(H_{hi}) \longrightarrow O_i^h \longrightarrow (t, \alpha) \longrightarrow B_{hi} \longrightarrow q_{hi} \longrightarrow (H_{hi}) \quad (3.14)$$

Dado que MITUS encuentra el estado de equilibrio de transporte y uso de suelo encontrando la localización H_{hi} , se redefinirán la localización como la variable J_{hi} , como se muestra en (3.13), pero a diferencia de H_{hi} no está en el equilibrio MITUS ya que se ha modificado la probabilidad de localización P_{hi} con la inclusión de q_{hi} .

En resumen los métodos propuestos son ad-hoc a cada objetivo, donde no se propone un método general que resuelva problemas de mejoramiento de indicadores de localización y/o transporte sino que cada uno de estos métodos buscan resolver cada objetivo particular planteado.

3.5. Comentarios del capítulo

La solución de los problemas de optimización mediante método aproximado, como es una heurística, corresponde a una etapa preliminar al estudio de una solución exacta que requiere abordar un nivel de complejidad que excede a esta tesis. Los enfoques que se proponen en este capítulo para el desarrollo de tales heurísticas están motivados por los métodos usados en transporte, por ejemplo tarificación a costo marginal en el caso del objetivo TT, o por una aproximación de las condiciones de primer orden de los problemas de optimización planteados en esta sección. La calidad de la aproximación obtenida se medirá en el capítulo 5 mediante simulaciones que permitan comparar la solución OMITUS en cada objetivo.

Capítulo 4

Diseño y Desarrollo de OMITUS

En este capítulo se desarrolla teóricamente el modelo OMITUS para los tres casos propuestos anteriormente. Se estudiará la heurística del índice TT, del IC y finalmente la de IS. Para esto se utilizará el modelo MITUS como base, el cual fue descrito en el capítulo 2.

4.1. OMITUS - TT

En esta sección se buscan las tarifas que permitan disminuir el tiempo total de la red a través del cálculo del costo marginal del usuario para que sea percibido dentro de su función de costo. Para esto, se utilizará el argumento del segundo principio de Wardrop y se aplicará al modelo MITUS, para reducir el tiempo total de viaje internalizando costos de congestión que no considera MITUS. Como el uso de suelo es endógeno y existen externalidades de localización, no se garantiza que la solución de equilibrio que entrega MITUS produzca los beneficios que se garantiza en el modelo con localización fija, por lo que el resultado en el capítulo 5 será revisado para su análisis.

Se calcula el tiempo de cada arco arco, multiplicando el flujo en el arco por el tiempo medio (s_a):

$$TT_a = \omega_a \cdot s_a(\omega_a) \quad (4.1)$$

y el tiempo marginal se calcula como:

$$smg_a = \frac{\partial TT_a}{\partial \omega_a} = s_a(\omega_a) + \frac{\partial s_a}{\partial \omega_a} \cdot \omega_a, \quad (4.2)$$

por lo que es necesario calcular $\frac{\partial s_a}{\partial \omega_a}$, usando 3.6, conocido como BPR, lo que entrega:

$$\frac{\partial s_a}{\partial \omega_a} = t_a^0 \cdot b_a \cdot \frac{e_a}{c_a} \left(\frac{\omega_a}{c_a} \right)^{e_a-1} \quad (4.3)$$

Por lo tanto smg_a queda expresado como sigue:

$$smg_a = t_a^0 \left[1 + b_a \cdot (1 + e_a) \left(\frac{\omega_a}{c_a} \right)^{e_a} \right] \quad (4.4)$$

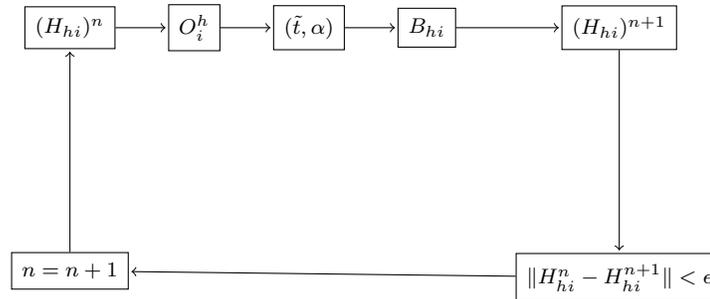
Debido a que (4.4) tiene la misma forma funcional que (3.6) (solo cambian los parámetros) se tiene que la forma de resolver el problema OMITUS - TT tiene la misma estructura que la de MITUS en Bravo et al. (2010), por lo tanto este problema tiene solución y es única; cuando se consideran las condiciones planteadas para MITUS; sin embargo, no sabemos si la solución obtenida es solución óptima de (3.5) debido al cambio en uso de suelo en cada iteración.

El algoritmo que resuelve este problema tiene los siguientes pasos:

- Paso 0: Inicializar (H_{hi}^0) .
- Paso 1: Calcular el vector de viajes generados (O_{hi}^k) de la ecuación (2.10) usando la localización H_{hi} .
- Paso 2: Calcular el par (\tilde{t}^k, α^k) a través de (2.11) y considerando (4.4).
- Paso 3: Construir los vectores $(b_{hi}^k)(H^k, O^k, t^k, \alpha^k)$ a través de (2.24).
- Paso 4: Calcular el vector b^k a partir de la ecuación (2.16) y calcular B_{hi} .
- Paso 5: Recalcular la localización H_{hi}

De forma esquemática es posible observar este proceso a continuación en donde \tilde{t} tiene la estructura de costos marginales en los arcos. En consecuencia para implementar la heurística del problema TT simplemente se modifica MITUS introduciendo un ajuste a los costos de transporte de manera que reflejen el costo marginal; se utiliza el software MITUS disponible.

Figura 4.1: Esquema planteado para OMITUS TT



4.2. OMITUS - IC

El IC es la medida que permite identificar el grado de congestión existente en la ciudad, donde se buscarán los subsidios o bien impuestos a aplicar en los arcos para lograr mejorar este indicador en el equilibrio, que será modelado según la figura 3.10.

El problema se ha formulado en (3.7), donde la resolución de este problema se plantea a través de una heurística y así poder encontrar las tarifas que permitan reducir el IC. La heurística se desarrolla a través de un gradiente aproximado de los flujos de transporte.

Para la conceptualización de la heurística se definen $a + 1$ vectores de precios que se utilizarán donde a es el número de arcos que tiene la red.

$$\begin{aligned}
 \vec{p}^n &= \{p_1^n, p_2^n, \dots, p_a^n\} \\
 \vec{p}^{n,1} &= \{p_1^{n-1}, p_2^n, \dots, p_a^n\} \\
 \vec{p}^{n,2} &= \{p_1^n, p_2^{n-1}, p_3^n, \dots, p_a^n\} \\
 &\vdots \\
 \vec{p}^{n,b} &= \{p_1^n, \dots, p_{b-1}^n, p_b^{n-1}, p_{b+1}^n, \dots, p_a^n\} \\
 &\vdots \\
 \vec{p}^{n,a} &= \{p_1^n, \dots, p_{a-1}^n, p_a^{n-1}\}
 \end{aligned}$$

Se define el gradiente aproximado $\tilde{\nabla}_b G_a(\vec{p}^n, \vec{p}^{n,b})$, el cual depende de dos vectores de precios y para su cálculo es necesario la realización del equilibrio MTE para cada uno de los vectores de precios analizados.

El gradiente aproximado se calcula de la siguiente forma:

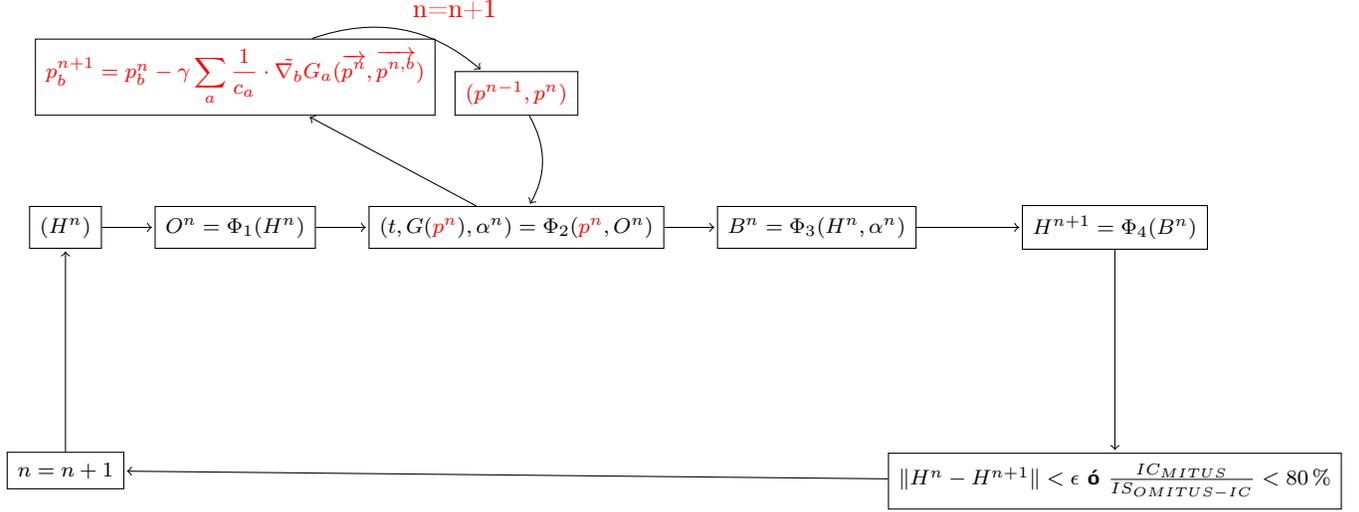
$$\tilde{\nabla}_b G_a(\vec{p}^n, \vec{p}^{n,b}) = \frac{1}{p_b^{n-1} - p_b^n} \left[G_a(\vec{p}^{n,b}) - G_a(\vec{p}^n) \right] \quad \forall a, \forall b \quad (4.5)$$

Para la realización del calculo de las tarifas se utiliza la siguiente fórmula.

$$p_b^{n+1} = p_b^n - \gamma \sum_a \frac{1}{c_a} \cdot \tilde{\nabla}_b G_a(\vec{p}^n, \vec{p}^{n,b}) \quad (4.6)$$

Para llevar a cabo la heurística se muestra el siguiente esquema, el cual permite apreciar las etapas que se realizan para lograr obtener los resultados, en rojo se muestran el sub ciclo que se realiza en la iteración global de OMITUS-IC.

Figura 4.2: Esquema planteado para OMITUS IC



Para complementar el esquema se explicita el pseudo-código con el fin de aclarar cada uno de los pasos de la heurística.

0. Tomar una localización inicial H^0 y para todo $n \in N$:
1. Se calcula la generación de viajes O a través de $\Phi_1(H^n)$.
2. Se hace $a + 1$ equilibrios de transporte a través de MTE utilizando $\Phi_2(p, O)$: $\forall a \in A$ un MTE para $\Phi_2(p^{n,a}, O^n)$ y un MTE para $\Phi_2(p^n, O^n)$. Se guarda $(G_a(\vec{p}^n, \vec{a}))_{a \in A}$, $G_a(\vec{p}^n)$ y α^n .
3. Se calculan las tarifas p^{n+1} según (4.6).
4. Se calculan las posturas B^n a través de $\Phi_3(H^n, \alpha^n)$.
5. Se calcula la matriz de localización final H^n utilizando $\phi_4(B^n)$.
6. Las iteraciones finalizan cuando se cumple a lo menos una de las condiciones de parada, en caso contrario continua con el paso 1.

- a) $\|H_{hi}^n - H_{hi}^{n+1}\| < \epsilon$.
- b) $\frac{IC_{MITUS}}{IS_{OMITUS-IC}} < 80\%$.

En el esquema y pseudo-código muestran los pasos del algoritmo utilizado para la resolución del problema, el cual fue explicado en la figura 4.2. Esta heurística será utilizada en el capítulo 5 para probar el modelo de forma numérica, método que no garantiza la convergencia del problema, pero será utilizado para constatar si este logra disminuir el índice planteado.

4.3. OMITUS - IS

El IS es una medida que permite estimar la segregación de la ciudad en términos de distribución de ingreso, es por esto que mediante una optimización de este índice, es posible llegar a una distribución socioeconómica más homogénea en la ciudad.

Como se expresó en (2.23) la disposición a pagar (B_{hi}) incluye el término del impuesto o subsidio para cada individuo con nivel de ingreso h en la zona i , según la siguiente expresión: $B_{hi}(H, O, t, \alpha) = u_{hi}^e + b_h + q_{hi}$, en donde el término $q_{hi} < 0$ cuando es impuesto y $q_{hi} > 0$ cuando es subsidio, calculando J_{hi} como se expresó en (2.24).

El problema a estudiar es:

$$\begin{aligned} & \min_{q_{hi}} \sum_i \left(\frac{\sum_h J_{hi}(q) \cdot I_h}{H_i} - \bar{I} \right)^2 \\ & \text{s.a.} \\ & \sum_h \sum_i q_{hi} \cdot J_{hi}(q) = T \end{aligned} \quad (4.7)$$

Para resolver el problema (4.7) se estudian las condiciones de primer orden a través del lagrangeano asociado, considerando la restricción de presupuesto y haciendo un paso sin considerar las restricciones de MITUS planteadas en las ecuaciones (2.17 - 2.25).

$$L(q) = \sum_i \left(\frac{\sum_h J_{hi} \cdot I_h}{H_i} - \bar{I} \right)^2 + \lambda \left(T - \sum_h \sum_i J_{hi} \cdot q_{hi} \right) \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial q_{lj}} = & \sum_i 2 \left(\frac{\sum_h J_{hi} \cdot I_h}{H_i} - \bar{I} \right) \left(\frac{\sum_h I_h \cdot \frac{\partial J_{hi}}{\partial q_{lj}}}{H_i} \right) \\ & - \lambda \cdot \sum_h \sum_i \left[q_{hi} \cdot \frac{\partial J_{hi}}{\partial q_{lj}} \right] - \lambda \cdot J_{lj} \end{aligned}$$

en donde se hace paramétrico el cálculo de $\frac{\partial J_{hi}}{\partial q_{lj}}$ en las variables u_{hi}^e , b_h^u dada la recursividad que se presentan en estas.

Se observa aquí que $\frac{\partial J_{hi}}{\partial q_{lj}}$ requiere derivar $\frac{\partial u_{hi}^e}{\partial q_{lj}}$ y $\frac{\partial b_h^u}{\partial q_{lj}}$, lo que genera un problema de recursividad. En el método aproximado que se propone estudiar suponemos que u_{hi}^e y b_h^u son exógenos para el cálculo de estas derivadas.

Haciendo $\frac{\partial L}{\partial q_{lj}} = 0$, el punto fijo queda definido como:

$$q_{lj} = \frac{2}{\lambda \cdot \partial J_{lj} / \partial q_{lj}} \cdot \left[\sum_{i \neq j} \left(\frac{\sum_h J_{hi} I_h}{H_i} - \bar{I} \right) \cdot \left(\frac{\sum_h \frac{\partial J_{hi}}{\partial q_{lj}} \cdot I_h}{H_i} \right) + \left(\frac{\sum_h I_h \cdot \frac{\partial J_{hj}}{\partial q_{lj}}}{H_j} \right) \left(\frac{\sum_h J_{hj} \cdot I_h}{H_j} - \bar{I} \right) \right] - \frac{(1/\lambda \cdot J_{lj}) + \sum_{h \neq l} \sum_{i \neq j} q_{hj} \frac{\partial J_{hj}}{\partial q_{lj}}}{\partial J_{lj} / \partial q_{lj}}$$

Derivamos J_{hi} con respecto a una tarifa cualquiera q_{lj} para utilizarlo en los cálculos anteriores.

Caso 1 ($i \neq j$):

$$\frac{\partial J_{hi}}{\partial q_{lj}} = 0 \quad (4.9)$$

Caso 2 ($i = j$):

$$\frac{\partial J_{hi}}{\partial q_{lj}} = \frac{\partial J_{hj}}{\partial q_{lj}} = -S_j \cdot \theta_j \cdot P_{h/j} \cdot P_{l/j} \quad (4.10)$$

$$= S_j \cdot \theta_j \cdot P_{l/j} (\delta_{hl} - P_{h/j}) \quad (4.11)$$

con $\delta_{hl} = 1$ si $h = l$ y $\delta_{hl} = 0$ si $h \neq l$.

Ambos casos es posible agruparlos como sigue,

$$\frac{\partial J_{hj}}{\partial q_{lj}} = S_j \cdot \theta_j \cdot P_{l/j} \cdot (\delta_{hl} - P_{h/j}) \quad \forall j, h, l \quad (4.12)$$

Tomando en cuenta que $\frac{\partial J_{hi}}{\partial q_{lj}} = 0$ si $i \neq j$, entonces q_{ij} queda de la siguiente forma:

$$q_{lj} = \frac{2}{\lambda \cdot \partial J_{lj} / \partial q_{lj}} \cdot \left[\left(\frac{\sum_h I_h \cdot \frac{\partial J_{hj}}{\partial q_{lj}}}{H_j} \right) \left(\frac{\sum_h J_{hj} \cdot I_h}{H_j} - \bar{I} \right) \right] - \frac{\frac{1}{\lambda} \cdot J_{lj}}{\partial J_{lj} / \partial q_{lj}} \quad (4.13)$$

El cálculo de λ se realiza a través de la siguiente estimación:

$$\lambda^{n+1} = \lambda^n - \alpha \left(T - \sum_h \sum_i J_{hi} \cdot q_{hi} \right) \quad (4.14)$$

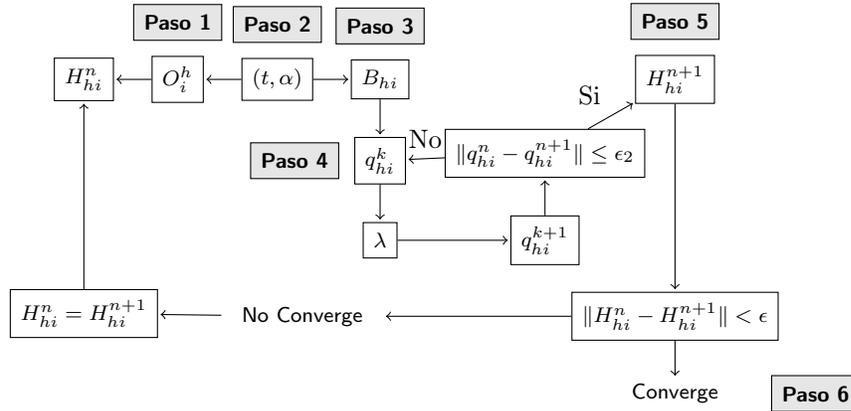
Para esto se tomó $\alpha = 0,9$ y se utiliza el siguiente algoritmo para solucionar el problema planteado. Este algoritmo consta de 8 pasos y se describen a continuación,

- Paso 0: Dar una localización inicial (H_{hi}^0) como punto de partida.
- Paso 1: Cálculo de la generación de viajes dado por O_i^h según la ecuación (2.10).
- Paso 2: Buscar el equilibrio de transporte (2.11) en donde se encuentran (t, α) .
- Paso 3: Cálculo de las posturas B_{hi} .

- Paso 4: Cálculo de las tarifas de localización (q_{hi}), a través del punto fijo dado por la ecuación (4.13), iterando con la ecuación (4.14) hasta que converja según esta ecuación.
- Paso 5: Cálculo de la localización (H_{hi}^{n+1}) y con esto se realiza el cálculo de la norma para el criterio de convergencia tal que $\|H_{hi}^n - H_{hi}^{n+1}\| < \epsilon$ en caso que no se haya llegado a el punto de convergencia se repite la iteración desde el Paso 1.
- Paso 6: Posterior a la convergencia y la obtención de los valores de q_{hi} se computa MITUS incluyendo las tarifas obtenidas y con esto se obtienen los índices planteados.

En la siguiente figura se muestran los pasos del algoritmo utilizado.

Figura 4.3: Esquema del algoritmo del problema IS



Capítulo 5

Simulaciones y Análisis de Resultados

Este capítulo está orientado a probar si las heurísticas propuestas efectivamente permiten mejorar los objetivos planteados y de esta forma se revisan los resultados obtenidos de las distintas heurísticas, para lo cual se utilizan nueve escenarios, cuyos parámetros son modificados para simular distintos casos y revisar el comportamiento de los modelos. Se analiza inicialmente el estado de equilibrio MITUS sin aplicar políticas para compararlo con OMITUS.

En todos los escenarios se consideró la misma cantidad de personas, y se fueron modificando los parámetros de atractividad, externalidades en las posturas del modelo y parámetros de transporte. Las simulaciones se llevan a cabo en la ciudad de Sioux Falls, la cual ha sido utilizada en varios modelos de equilibrio de uso de suelo entre ellos MITUS en Bravo et al. (2010). Sioux Falls es una ciudad ubicada en el estado de Dakota del Sur, EE.UU. La ciudad se modela tomando en cuenta 24 nodos (i), 78 arcos (a) y 5 tipos de usuarios (h).

5.1. Detalle de parámetros y ecuaciones utilizadas

En la presente sección se recordarán los parámetros del modelo MITUS, explicados en los capítulos (2) y (3).

Las simulaciones fueron programadas en el lenguaje de C++ a través de varias bibliotecas (Blitz++, Boost, log4cxx, CMake) que permiten asignarle velocidad y robustez a la programación. Como base, se utilizó la programación de MITUS realizando las modificaciones para lograr cada uno de los modelos.

Las funciones utilizadas para la modelación son las siguientes:

5.1. Detalle de parámetros y ecuaciones utilizadas

$$s_a(\omega_a) = t_a^0 \left[1 + b_a \left(\frac{\omega_a}{\epsilon_a \cdot c_a} \right) \right] \quad (5.1)$$

$$\tau_i^{dh} = -\frac{1}{\beta} \ln \left(\sum_{a \in A_i^+} \exp[-\beta(t_a + \tau_{ja}^{dh})] \right) \quad (5.2)$$

$$b_{hi}^e(H, O, \alpha, t) = z_{hi} + \nu_h \frac{\ln O_{hi}}{O^*} + \rho_h \frac{\alpha_{hi}}{\alpha^*} + \chi_h \frac{\gamma_i(H)}{\gamma^*} + \psi_h \frac{\Omega_{hi}(H_i)}{\Omega^*} \quad (5.3)$$

$$\gamma_d(H) = \sum_h \sum_k \zeta_{hk} H_{kd} \quad (5.4)$$

$$\Omega_{hi}(H_i) = \sum_k \omega_{hk} H_{ki} \quad (5.5)$$

Donde

- $O^* = \ln[\text{máx}_{hi}(N_{hi})H^* + \text{máx}_{hi}(\delta_{hi})]$.
- $\alpha_{hi}^* = \frac{1}{\mu_h} [\ln(\sum_{d \in D} \exp(-\mu_h \tau_i^{d[0]})) - O^*]$ con $\tau_i^{d[0]}$ ruta más corta.
- $\gamma^* = H \cdot \text{máx}_{hh}(\zeta_{hh})H^*$, la cual es la atractividad de la zona d, con ζ_{hk} es el factor de atracción, con $H = 5$ (tipos de hogares).
- $\Omega^* = H \cdot \text{máx}_{hh}(\omega_{hh})H^*$, con $H = 5$ (tipos de hogares).
- ω_{hk} , es la externalidad de los usuarios tipo k sobre los usuarios tipo h .
- $H^* = \text{máx}_h(H_h)$.

Para realizar las modelaciones se consideraron 5 tipos de hogares según su nivel de ingreso (ver tabla 5.1), en donde todos tienen la misma cantidad de hogares.

Tabla 5.1: Niveles de ingreso

I_1	0.2
I_2	0.4
I_3	0.6
I_4	0.8
I_5	1.0

Además, se consideraron varios escenarios como distintos puntos de partida para la modelación para determinar los cambios según el modelo utilizado. Para ellos se utilizó la oferta inmobiliaria fija e igual a $S_i = 2000 \quad \forall i$.

5.1. Detalle de parámetros y ecuaciones utilizadas

Los parámetros utilizados que permiten las simulaciones se indican a continuación (ver tablas 5.2, 5.3).

Tabla 5.2: Parámetros

Parámetro	Valor
ν_h	1.0 $\forall h$
χ_h	1.0 $\forall h$
ψ_h	1.0 $\forall h$
ζ_{hh}	1.0 $\forall h$
δ_{hi}	0.1 $\forall h, i$
β	0.5
θ_i	0.5 $\forall i$

Tabla 5.3: Parámetros de accesibilidad

Parámetro	Valor
ρ_1	1.0
ρ_2	2.0
ρ_3	3.0
ρ_4	4.0
ρ_5	5.0

Descripción de parámetros en (5.3).

- ν_h : Parámetro asociado a la generación de viajes en las posturas.
- ζ_{hk} : Parámetro asociado a la accesibilidad.
- χ_h : Parámetro asociado a la atractividad.
- ψ_h : Parámetro asociado a la externalidad.
- δ_{hi} : Perturbación de generación.
- β : Parámetro Gumbel asociado a la varianza del tiempo esperado de viaje.
- μ_h : Parámetro Gumbel asociado a la varianza del costo de transporte en la distribución y asignación a la red
- θ_i : Parámetro Gumbel asociado al inverso de la varianza de las posturas en la localización.

- z_{hi} : Parámetro exógeno en el uso de suelo representa la atractividad de cada zona asociada a características naturales, como altura de la zona, fuente de ríos o costa, etc.

5.2. Descripción de escenarios

A continuación son descritos los escenarios a través de los parámetros que se diferencian para poder analizar cada uno de los modelos que se trabajan, para esto se muestra en la tabla 5.4, los cuales varían del escenario anterior en un parámetro de tal forma que sea posible identificar las modificaciones realizadas en los modelos.

El escenario 1 muestra un escenario homogéneo, el escenario 2 cambia en algunos nodos la atracción, manteniendo los otros parámetros constantes con respecto al escenario 1. El escenario 3 cambia la matriz de externalidad reflejando como la decisión de localizarse se ve afectada por los usuarios ya localizados en esa zona y conservando atractividad homogénea, pero con valores nulos. El escenario 4 es modelado con atractividades diferentes para las zonas, incluyendo la matriz de externalidades. Para los siguientes escenarios 5 al 9, se utilizan las modificaciones de escenarios anteriores y se considera el parámetro μ_h asociado al costo de transporte en una magnitud menor, lo cual modifica la distribución de viajes.

Tabla 5.4: Caracterización de Escenarios

Escenario \ Parámetro	z_{hi}	ω_{hh}	μ_h	H_h
Escenario 1	$1 \forall h, i$	$1 \forall h$	$1 \forall h$	$H1$
Escenario 2	Z	$1 \forall h$	$1 \forall h$	$H1$
Escenario 3	$0 \forall h, i$	Ω	$1 \forall h$	$H1$
Escenario 4	Z	Ω	$1 \forall h$	$H1$
Escenario 5	Z	Ω	$0.1 \forall h$	$H1$
Escenario 6	$0 \forall h, i$	Ω	$0.1 \forall h$	$H1$
Escenario 7	$0 \forall h, i$	$0 \forall h$	$0.1 \forall h$	$H1$
Escenario 8	$Z \cdot 10^{-1}$	Ω	$0.1 \forall h$	$H1$
Escenario 9	$Z \cdot 10^{-1}$	Ω	$0.1 \forall h$	$H2$

Donde:

Z se define como:

$$z_{hi} = 1 \begin{cases} i = 0, 2, 10, 11 & \wedge h = 1, 2, 3 \\ i = 6, 7, 13, 14 & \wedge h = 4, 5 \end{cases}$$

$$z_{hi} = 0 \quad \sim$$

5.2. Descripción de escenarios

Ω está compuesto por la siguiente matriz:

$$\omega_{hk} = \begin{bmatrix} 2 & 4 & 8 & 8 & 12 \\ -4 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ -6 & 3 & 2 & 6 & 8 \\ -6 & -4 & -2 & 2 & 8 \\ -0,2 & -0,2 & -0,2 & -0,2 & 2 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

La cantidad de hogares por estrato es fijo y se representa por los vectores $H1$ y $H2$ que se muestran en (5.6) y (5.7) respectivamente:

$$H1 = \begin{cases} 9600, & h = 1 \\ 9600, & h = 2 \\ 9600, & h = 3 \\ 9600, & h = 4 \\ 9600, & h = 5 \end{cases} \quad (5.6)$$

$$H2 = \begin{cases} 12600, & h = 1 \\ 12600, & h = 2 \\ 9600, & h = 3 \\ 7600, & h = 4 \\ 5600, & h = 5 \end{cases} \quad (5.7)$$

Es posible ver en la Figura 5.1 la estructura de la ciudad en donde muestran los números de los nodos y la escala de colores utilizados, tanto para los arcos según el nivel de congestión, como para los nodos según el ingreso medio de la población localizada.

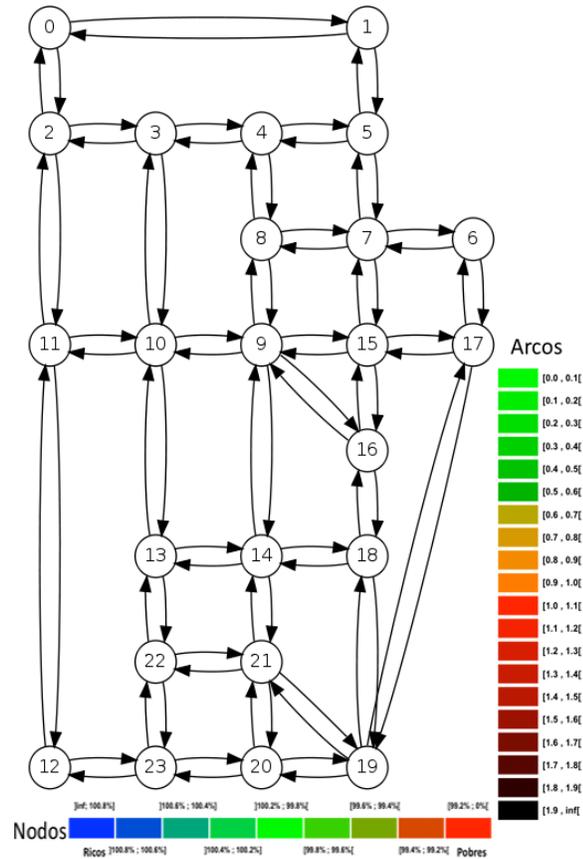


Figura 5.1: Estructura de la ciudad a modelar

5.3. Análisis de escenarios simulados

El análisis se realizará primero para los escenarios en las tres políticas de planificación (i.e. TT, IC e IS), para luego plantear el resumen de tales escenarios y hacer una comparación global.

5.3.1. Escenario 1

El escenario 1 es un escenario homogéneo en las zonas sin diferencia en los parámetros de localización (ver figura 5.2) donde se toma como referencia los valores de equilibrio para $TT=81034,1$, $IC=16,3\%$, $IS=2,1 \cdot 10^{-5}$ donde TT está en unidades de tiempo e IS está en unidades de ingreso.

En la tabla (5.5) se muestran los porcentajes que llegaron los índices después de aplicar las heurísticas de solución, que indican el cociente entre el índice con el modelo vs el índice de MITUS. Como se observa, en los dos modelos que involucran políticas de transporte

5.3. Análisis de escenarios simulados

OMITUS-TT y OMITUS-IC, existió una reducción en el tiempo total (TT) y en el índice de congestión (IC), existiendo un impacto positivo para el índice de segregación (IS) en el modelo OMITUS-TT, al contrario de OMITUS-IC.

El modelo OMITUS-IS permitió una disminución de los tres índices siendo el que más se beneficia es el IS, el cual se redujo a un 22% ($4,5 \cdot 10^{-6} / 2,1 \cdot 10^{-5} = 22\%$).

Tabla 5.5: Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 1

Escenario 1	TT	IC	IS
OMITUS-TT	89 %	87 %	57 %
OMITUS-IC	76 %	73 %	75 %
OMITUS-IS	95 %	95 %	22 %

Es posible hacer notar que la solución OMITUS-IC produce mayores mejoras que la modelación de OMITUS-TT que resulta sub-óptimo, lo cual muestra que OMITUS-TT produce mejoras sin garantizar la solución óptima

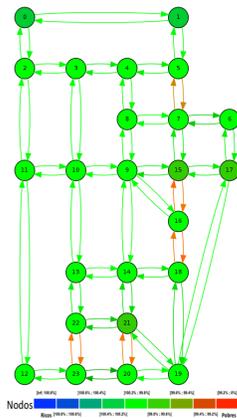


Figura 5.2: Esc. 1 MITUS

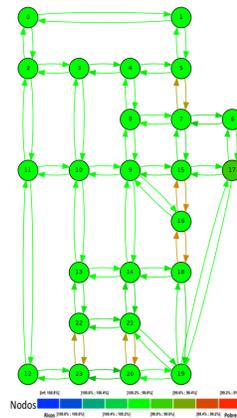


Figura 5.3: Esc. 1 OMITUS-TT

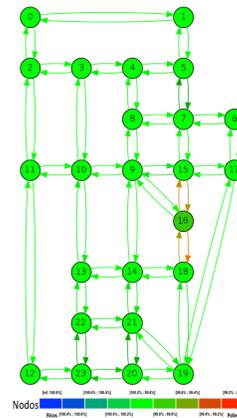


Figura 5.4: Esc. 1 OMITUS-IC

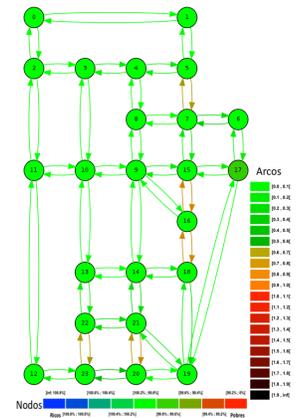


Figura 5.5: Esc. 1 OMITUS-IS

5.3.2. Escenario 2

Este escenario se caracteriza por concentración de población de menores y mayores ingresos causada por la atractividad Z (ver figura 5.6), y toma como referencia los valores de equilibrio para $TT=81326,2$, $IC=16,4\%$, $IS=4,3 \cdot 10^{-2}$.

Es posible observar en la Tabla 5.6, que existe una reducción importante llegando a un 76% en el índice TT para el modelo OMITUS-IC. Además el modelo OMITUS-TT

5.3. Análisis de escenarios simulados

permitió una reducción en los indicadores de TT y IC, manteniendo el IS para OMITUS-TT y aumentando para OMITUS-IC. Por el otro lado, si se compara el modelo OMITUS-IS identificamos una reducción a un 25% del índice de segregación con OMITUS-IS, mientras existe una reducción menor en los índices IC y TT llegando a un 95%, con lo cual vemos que se afecta de forma positiva los tres índices con esta política.

Tabla 5.6: Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 2

Escenario 2	TT	IC	IS
OMITUS-TT	89 %	86 %	100 %
OMITUS-IC	76 %	73 %	102 %
OMITUS-IS	95 %	95 %	25 %

Se puede identificar los cambios en la red de transporte y uso de suelo en las siguientes figuras (5.6, 5.7, 5.8, 5.9) en donde se detectan variaciones en la red de transporte para los OMITUS-TT y OMITUS-IC principalmente en las figuras (5.7, 5.8). Por otra parte, se observan cambios en el uso de suelo y transporte para el caso OMITUS-IS (figura 5.9) mostrando principalmente cambios en las zonas.

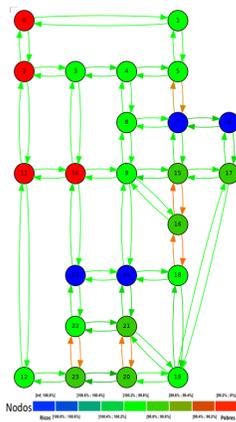


Figura 5.6: Esc. 2 MITUS

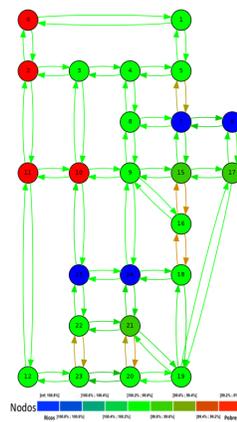


Figura 5.7: Esc. 2 OMITUS-TT

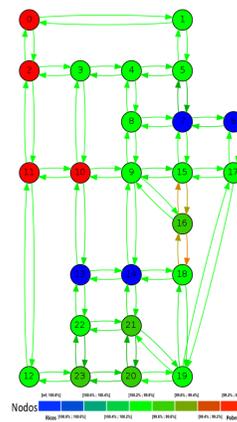


Figura 5.8: Esc. 2 OMITUS-IC

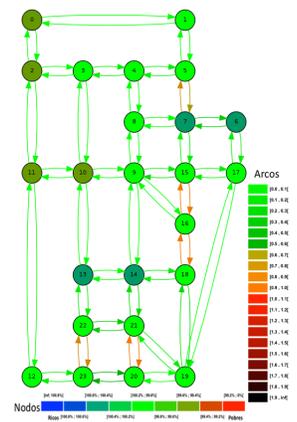


Figura 5.9: Esc. 2 OMITUS-IS

5.3.3. Escenario 3

Este escenario se caracteriza por la inclusión de externalidades de localización dada por Ω (ver figura 5.10), el cual toma como referencia los valores de equilibrio para $TT=81034.1$, $IC=16,3\%$, $IS=2,1 \cdot 10^{-5}$.

5.3. Análisis de escenarios simulados

Se observan cambios similares al Escenario 1; se distingue una reducción de TT y IC para los tres modelos, teniendo un impacto mayor el modelo OMITUS-IC para ambos índices, el índice IS tiene un impacto positivo en OMITUS-TT y OMITUS-IS. De este último se observa una reducción llegando a un 22 %.

Tabla 5.7: Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 3

Escenario 3	TT	IC	IS
OMITUS-TT	89 %	87 %	57 %
OMITUS-IC	76 %	73 %	75 %
OMITUS-IS	95 %	95 %	22 %

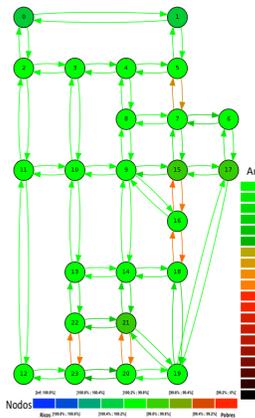


Figura 5.10: Esc. 3 MITUS

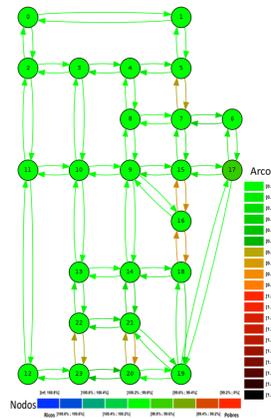


Figura 5.11: Esc. 3 OMITUS-TT

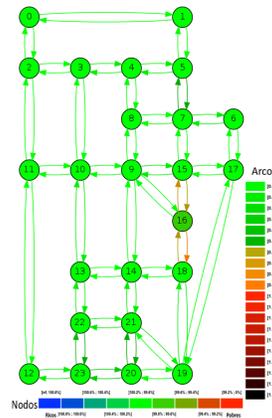


Figura 5.12: Esc. 3 OMITUS-IC

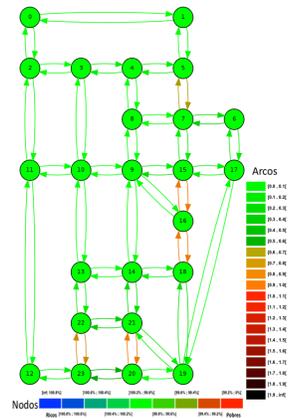


Figura 5.13: Esc. 3 OMITUS-IS

5.3.4. Escenario 4

Este escenario se caracteriza por la inclusión de externalidades de localización dadas por Ω y además de la atractividad Z (ver figura 5.14), toma como referencia los valores de equilibrio para $TT=81327.1$, $IC=16,4\%$, $IS=4,3 \cdot 10^{-2}$.

Tiene reducción de los índices TT y IC para los tres modelos, teniendo un impacto mayor para el modelo OMITUS-IC, mientras que el índice IS al igual que en los casos anteriores tiene un impacto positivo únicamente para el modelo OMITUS-IS, el cual se reduce y llega a un 24 %.

Tabla 5.8: Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 4

Escenario 4	TT	IC	IS
OMITUS-TT	89 %	86 %	100 %
OMITUS-IC	76 %	73 %	102 %
OMITUS-IS	95 %	95 %	24 %

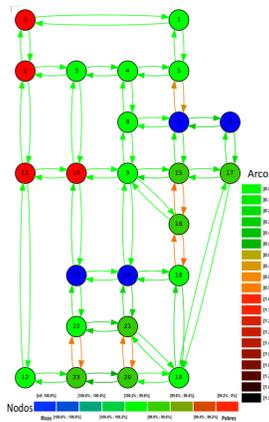


Figura 5.14: Esc. 4 MITUS

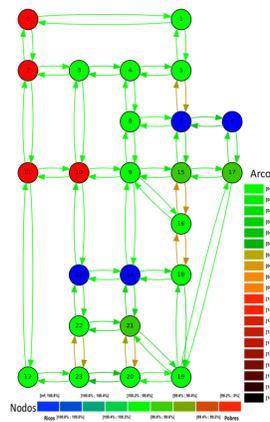


Figura 5.15: Esc. 4 OMITUS-TT

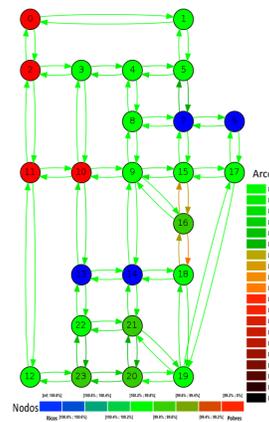


Figura 5.16: Esc. 4 OMITUS-IC

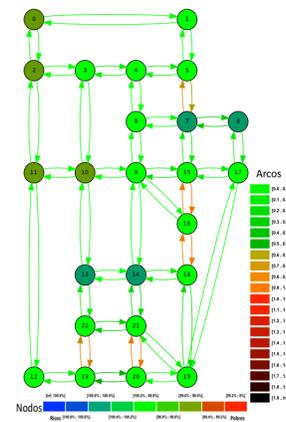


Figura 5.17: Esc. 4 OMITUS-IS

5.3.5. Escenario 5

Este escenario, y los siguientes, muestran el efecto de un cambio en la distribución de viajes, debido a la disminución de μ_h como se muestra en la Tabla 5.4, que implica una mayor dispersión de los destinos. Esto se observa en el aumento de los tiempos de viaje y congestión (ver figura 5.18), tomando como referencia los valores de equilibrio para $TT=1579970$, $IC=111,8\%$, $IS=4,9 \cdot 10^{-2}$.

En los índices TT y IC se muestran beneficios para los tres modelos, pero el modelo que presenta un impacto mayor en ambos índices es OMITUS-TT, en TT llegando a un 58 %. Por otro lado, el IS presenta mejoras en el modelo OMITUS-IS llegando a un 46 %, y muestra un impacto menor en los índices TT e IC.

Este escenario al tener tiempos mayores de traslado y una mayor congestión, los modelos que impactan de mayor forma son los que tienen relación con el transporte, especialmente cuando se toma en cuenta el costo marginal de cada usuario, ambos afectando de menor forma la localización.

Tabla 5.9: Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 5

Escenario 5	TT	IC	IS
OMITUS-TT	58 %	78 %	103 %
OMITUS-IC	61 %	79 %	98 %
OMITUS-IS	95 %	98 %	46 %

En este caso OMITUS-IC entrega peores resultados que OMITUS-TT para el índice IC, cosa que ocurre en los siguientes escenarios analizados.

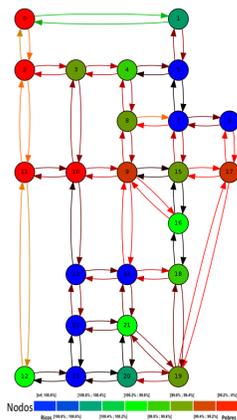


Figura 5.18: Esc. 5 MITUS

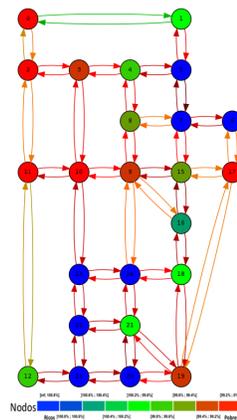


Figura 5.19: Esc. 5 OMITUS-TT

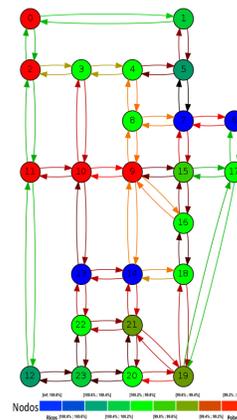


Figura 5.20: Esc. 5 OMITUS-IC

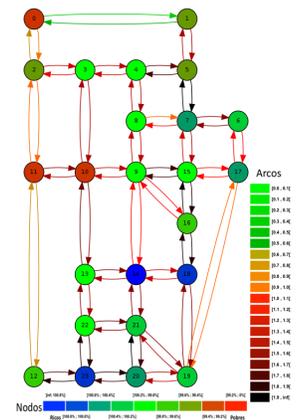


Figura 5.21: Esc. 5 OMITUS-IS

5.3.6. Escenario 6

Este escenario se caracteriza por la inclusión de externalidades de localización dadas por Ω , dejando la atractividad de forma homogénea y tomando el factor de escala μ_h igual al del Escenario 5, el cual toma como referencia los valores de equilibrio para $TT=1578690$, $IC = 111,7\%$, $IS=3,1 \cdot 10^{-4}$.

Se observa un impacto en el índice TT para el modelo OMITUS-TT llegando a un 58 % y a un 78 % en IC. Se identifica un impacto positivo llegando a un 60 % del índice IS con el modelo OMITUS-IS. Además se tiene una leve mejoría en los índices TT y IC llegando a un 93 % y 97 % respectivamente.

Tabla 5.10: Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 6

Escenario 6	TT	IC	IS
OMITUS-TT	58 %	78 %	186 %
OMITUS-IC	61 %	79 %	40 %
OMITUS-IS	93 %	97 %	60 %

Se observa que el índice IS empeora fuertemente cuando mejoran los índices TT y IC para los casos de OMITUS-TT y OMITUS-IC.

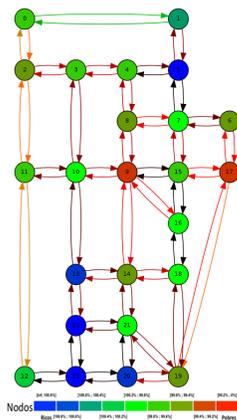


Figura 5.22: Esc. 6 MITUS

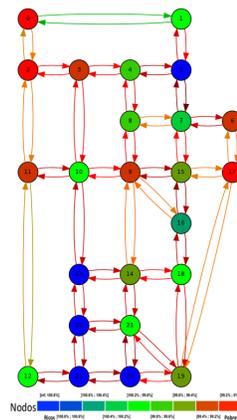


Figura 5.23: Esc. 6 OMITUS-TT

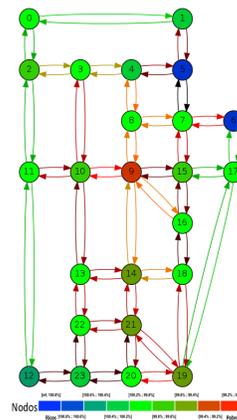


Figura 5.24: Esc. 6 OMITUS-IC

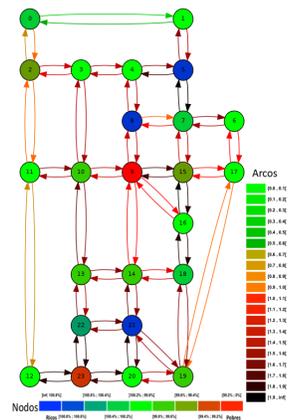


Figura 5.25: Esc. 6 OMITUS-IS

5.3.7. Escenario 7

Este escenario se caracteriza por un escenario homogéneo en los parámetros de atracción y externalidad nula, el cual se le incluye el parámetro μ_h igual al del Escenario 5, tomando como referencia los valores de equilibrio para $TT=1578690$, $IC=111,7\%$, $IS=3,0 \cdot 10^{-4}$.

Se muestra una disminución del índice TT con mayor impacto en el modelo OMITUS-TT, asimismo el índice IC tiene disminución de una forma similar al de TT.

Por otro lado el índice IS tiene un impacto positivo únicamente en el modelo OMITUS-IS.

Tabla 5.11: Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 7

Escenario 7	TT	IC	IS
OMITUS-TT	58 %	78 %	186 %
OMITUS-IC	61 %	79 %	40 %
OMITUS-IS	93 %	97 %	78 %

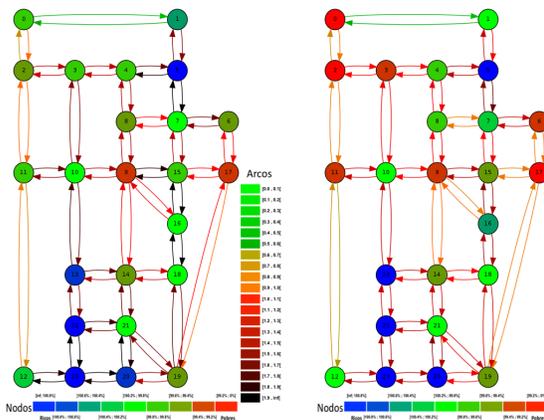


Figura 5.26: Esc. 7 MITUS

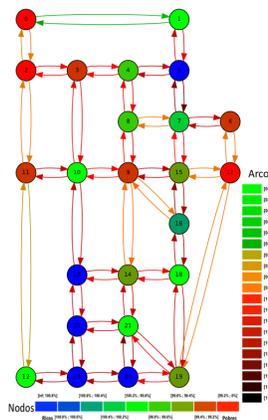


Figura 5.27: Esc. 7 OMITUS-TT

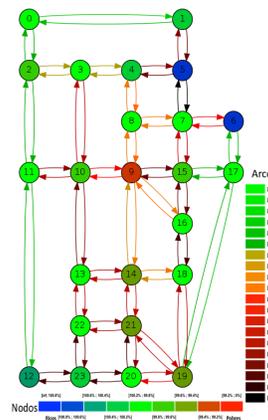


Figura 5.28: Esc. 7 OMITUS-IC

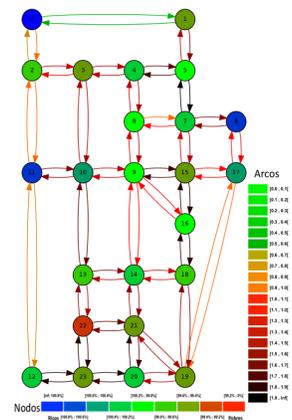


Figura 5.29: Esc. 7 OMITUS-IS

5.3.8. Escenario 8

Este escenario toma como base el escenario 5, haciendo la modificación de los parámetros de atractividad, tomando valores de Z pero multiplicado por 10^{-1} (ver figura 5.30), el cual toma como referencia los valores de equilibrio para $TT=1578710$, $IC=111,7\%$, $IS=8,1 \cdot 10^{-4}$.

Se muestra un comportamiento similar a los escenarios 5, 6 y 7, los cuales tienen un impacto mayor en los índices TT y IC para el modelo OMITUS-TT y un impacto menor para los otros modelos.

El IS muestra impacto para el modelo OMITUS-IS llegando a un 34 %; los otros índices TT y IC muestran una disminución menor y llegan a un 93 % y 97 % respectivamente para este modelo.

Tabla 5.12: Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 8

Escenario 8	TT	IC	IS
OMITUS-TT	58 %	78 %	140 %
OMITUS-IC	61 %	79 %	93 %
OMITUS-IS	93 %	97 %	34 %

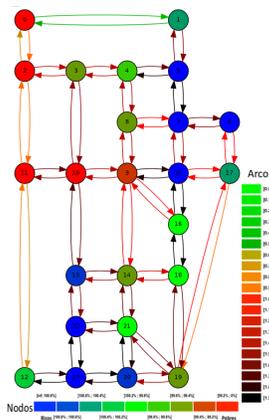


Figura 5.30: Esc. 8 MITUS

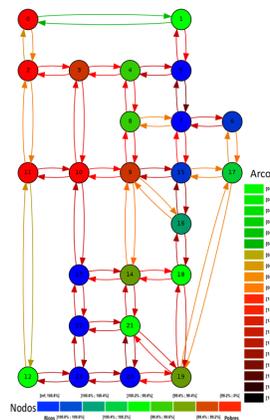


Figura 5.31: Esc. 8 OMITUS-TT

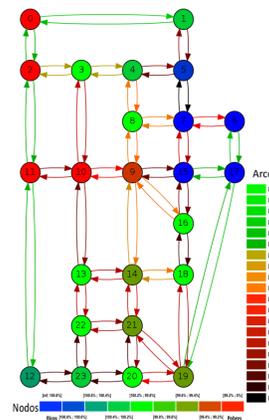


Figura 5.32: Esc. 8 OMITUS-IC

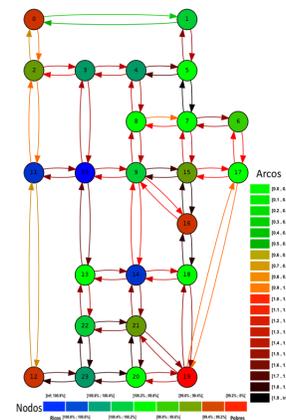


Figura 5.33: Esc. 8 OMITUS-IS

5.3.9. Escenario 9

Para este escenario, con valores similares en los índices TT y IC de los escenarios 5, 6, 7 y 8 en el equilibrio MITUS, se observa que el índice IS es menor dado que se modifica el número de hogares, según el escenario 8 (ver figura 5.34). Este escenario toma como referencia los valores de equilibrio para $TT=1515720$, $IC=110,0\%$, $IS=6,2 \cdot 10^{-4}$.

Esto lleva a una reducción del índice IS, llegando a niveles similares de los escenarios anteriores, pero el impacto en el porcentaje es menor a lo que se pudo observar anteriormente.

Para los otros índices, ocurren impactos similares a los observado en los escenarios anteriores para los tres índices trabajados.

5.4. Análisis de resultados

Tabla 5.13: Cambios de índices con respecto al equilibrio MITUS del Escenario 9

Escenario 9	TT	IC	IS
OMITUS-TT	59 %	78 %	141 %
OMITUS-IC	62 %	79 %	96 %
OMITUS-IS	96 %	99 %	59 %

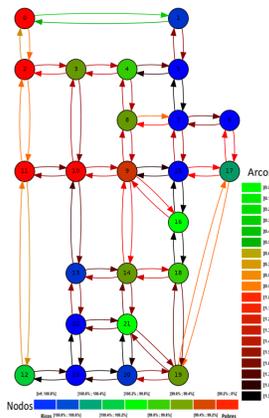


Figura 5.34: Esc. 9 MITUS

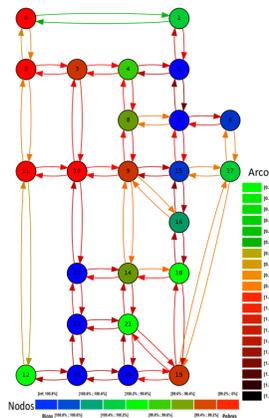


Figura 5.35: Esc. 9 OMITUS-TT

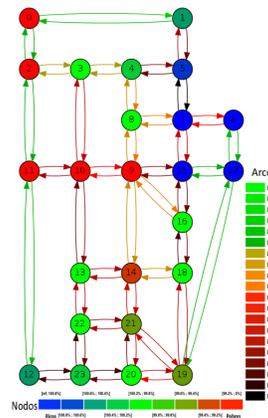


Figura 5.36: Esc. 9 OMITUS-IC

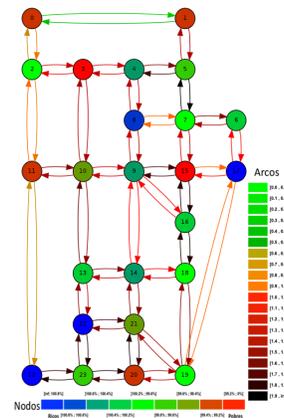


Figura 5.37: Esc. 9 OMITUS-IS

5.4. Análisis de resultados

Para realizar el análisis de los resultados se utiliza el modelo MITUS en todos los escenarios, teniendo como punto de comparación el modelo inicial. Luego de esto, se analizan los modelos realizando la comparación con el equilibrio sin políticas urbanas.

5.4.1. MITUS

En todos los escenarios simulados se obtuvo la convergencia del modelo MITUS al equilibrio.

Para el equilibrio MITUS se encuentran los resultados de los tres índices a analizar en donde TT está en unidades de tiempo, IC es un índice sin unidades e IS es una medida que está en unidades de ingreso de dinero al cuadrado. En la tabla (5.14) se muestran los resultados, dentro de los cuales es posible identificar que los escenarios 1 al 4 representan escenarios de baja congestión, mientras que los escenarios 5 al 9 son de alta congestión.

Tabla 5.14: Índices en el equilibrio MITUS

MITUS	TT	IC	IS
Escenario 1	81034	16,3	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Escenario 2	81326	16,4	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Escenario 3	81034	16,3	$2,1 \cdot 10^{-5}$
Escenario 4	81327	16,4	$4,3 \cdot 10^{-2}$
Escenario 5	1579970	111,8	$4,9 \cdot 10^{-2}$
Escenario 6	1578690	111,7	$3,1 \cdot 10^{-4}$
Escenario 7	1578690	111,7	$3,0 \cdot 10^{-4}$
Escenario 8	1578710	111,7	$8,1 \cdot 10^{-4}$
Escenario 9	1515720	110,0	$6,2 \cdot 10^{-4}$

5.4.2. OMITUS - TT

En la optimización del tiempo total de la red, se obtuvieron resultados que presentan mejoras sustanciales en términos de reducción del tiempo total de la red; (también se observa reducción de los otros indicadores medidos). Como se puede ver en la Tabla 5.15 donde $\Delta TT(\%) = \frac{TT(OMITUS)}{TT(MITUS)}$ representa el porcentaje que obtuvo el indicador con respecto al valor inicial del equilibrio.

Tabla 5.15: Comparación índice TT

Escenario	TT(MITUS)	TT (OMITUS TT)	TT (OMITUS IC)	TT (OMITUS IS)
Escenario 1	81034	89 %	76 %	95 %
Escenario 2	81326	89 %	76 %	95 %
Escenario 3	81034	89 %	76 %	95 %
Escenario 4	81327	89 %	76 %	95 %
Escenario 5	1579970	58 %	61 %	95 %
Escenario 6	1578690	58 %	61 %	93 %
Escenario 7	1578690	58 %	61 %	93 %
Escenario 8	1578710	58 %	61 %	93 %
Escenario 9	1515720	59 %	62 %	96 %

A partir de lo anterior, es posible detectar una mayor disminución del tiempo total y del índice de congestión en todos los escenarios, aún así la mayor disminución del nivel de congestión se identifica en los escenarios que presentan mayores niveles de congestión.

En las Figuras 5.38 y 5.39 se comparan los distintos modelos que muestran cómo se produce la mejora en el índice. En efecto el modelo OMITUS-TT encuentra mejoras

5.4. Análisis de resultados

considerables llegando a un 58 % para los escenarios con mayor tiempo total (escenarios 5 al 9), tal como se muestra en la Figura 5.39, mientras que los escenarios en donde el tiempo total es menor encuentran mejoras modestas llegando a un 89 % (Figura 5.38). Es posible observar que en los primeros escenarios (1-4) se captura una mayor mejora del índice TT para OMITUS-IC en contraste de OMITUS-TT.

Los tiempos de ejecución de este modelo están del orden de 5 minutos, esto es producto que es utilizada la misma estructura de MITUS y su algoritmo de solución.

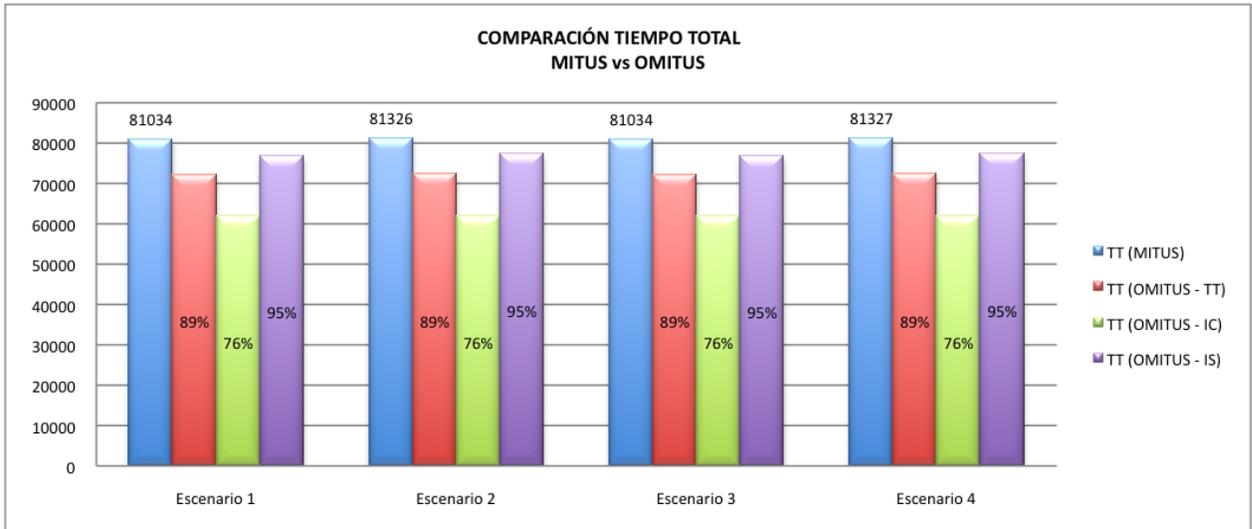


Figura 5.38: Gráfico TT1

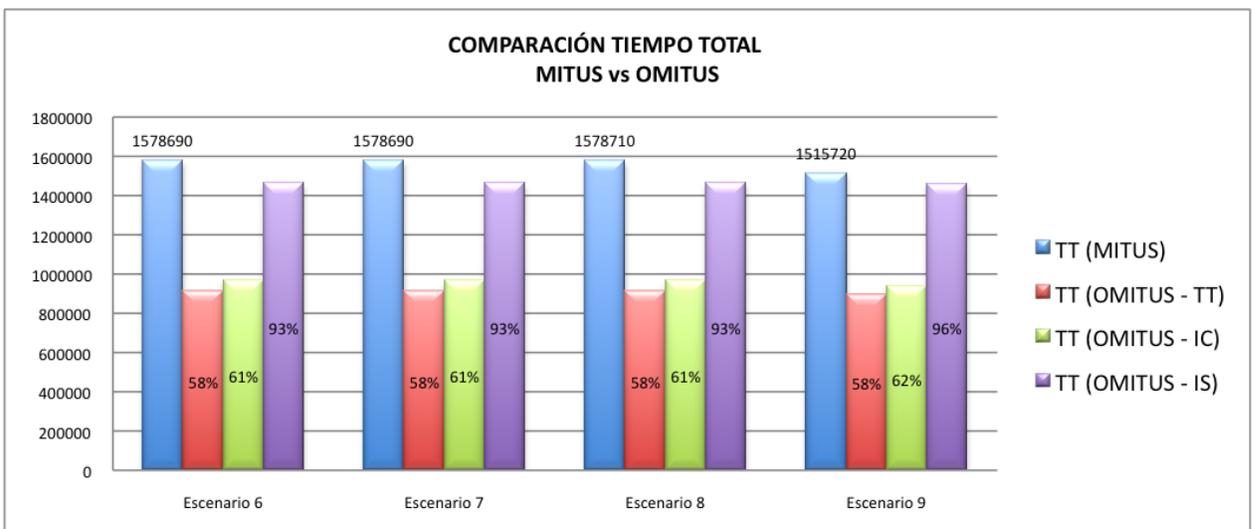


Figura 5.39: Gráfico TT2

5.4.3. OMITUS - IC

El modelo busca la minimización de la congestión. Para esto se utiliza el índice mostrado en la ecuación (3.3), $IC_a = G_a/c_a$ agregado a toda la red. Se programó el algoritmo de solución (revisado en el capítulo 4), en donde los resultados obtenidos para los distintos escenarios fueron los siguientes:

Tabla 5.16: Comparación índice IC

Escenario	IC(MITUS)	IC (OMITUS <i>TT</i>)	IC (OMITUS <i>IC</i>)	IC (OMITUS <i>IS</i>)
Escenario 1	16.3	87 %	73 %	95 %
Escenario 2	16.4	86 %	73 %	95 %
Escenario 3	16.3	87 %	73 %	95 %
Escenario 4	16.4	86 %	73 %	95 %
Escenario 5	111.8	78 %	79 %	98 %
Escenario 6	111.7	78 %	79 %	97 %
Escenario 7	111.7	78 %	79 %	97 %
Escenario 8	111.7	78 %	79 %	97 %
Escenario 9	110.0	78 %	79 %	99 %

El índice de congestión muestra mejoras en todos los escenarios, pudiendo verificar que en los escenarios que tienen una congestión menor (5.40) se produce una disminución mayor de IC en respecto a las otras heurísticas, mientras que para los escenarios con congestión alta (5.41) se observa una mejora mayor en el IC de la heurística utilizada en OMITUS-TT. De esta forma es posible encontrar relación y mejoras entre ambos índices, aplicando ambas heurísticas, no así con el caso de OMITUS-IS, ya que para ambos indicadores obtenemos resultados similares con respecto al equilibrio MITUS sin políticas implementadas, donde $\Delta IC(\%) = \frac{IC(OMITUS)}{IC(MITUS)}$.

Los tiempos de ejecución de este modelo supera los tiempos de las otras heurísticas, dado a los múltiples equilibrio de transporte (MTE) que se realizan para determinar las tarifas de en los arcos.

5.4. Análisis de resultados

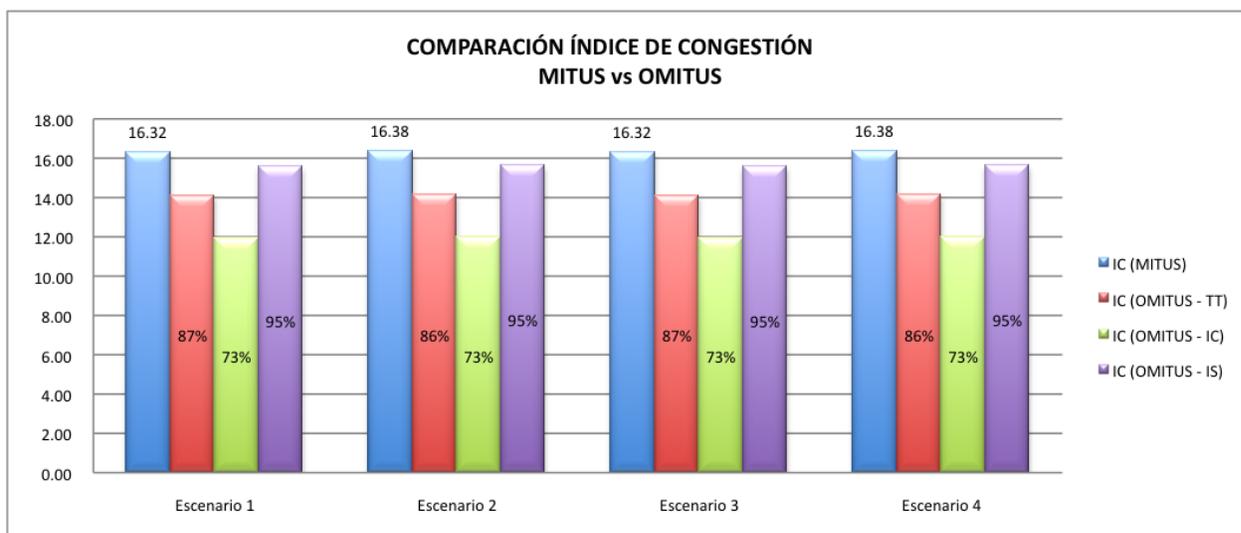


Figura 5.40: Gráfico IC1

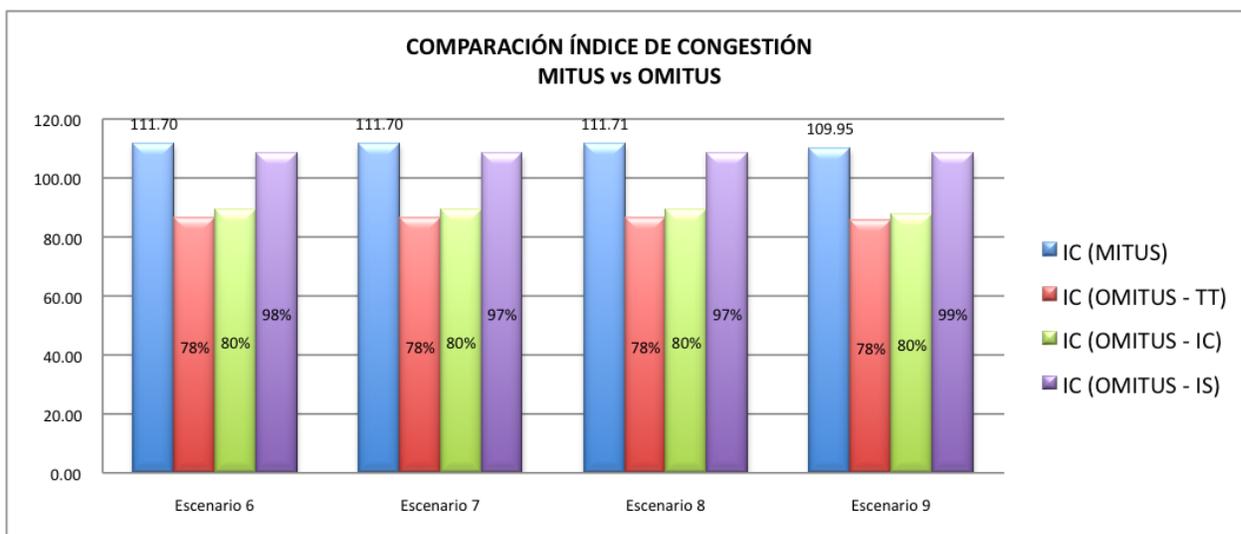


Figura 5.41: Gráfico IC2

5.4.4. OMITUS - IS

A continuación en la tabla (5.17) se muestran los resultados de la simulación del modelo OMITUS-IS para todos los escenarios considerados en el estudio. Estos serán analizados realizando las comparaciones respectivas más adelante.

5.4. Análisis de resultados

Tabla 5.17: Comparación índice IS

Escenario	TT(MITUS)	OMITUS TT	OMITUS IC	OMITUS IS
Escenario 1	$2,1 \cdot 10^{-5}$	57 %	75 %	22 %
Escenario 2	$4,3 \cdot 10^{-2}$	100 %	102 %	25 %
Escenario 3	$2,1 \cdot 10^{-5}$	57 %	75 %	22 %
Escenario 4	$4,3 \cdot 10^{-2}$	100 %	102 %	24 %
Escenario 5	$4,9 \cdot 10^{-2}$	103 %	98 %	46 %
Escenario 6	$3,1 \cdot 10^{-4}$	186 %	40 %	60 %
Escenario 7	$3,0 \cdot 10^{-4}$	186 %	40 %	78 %
Escenario 8	$8,1 \cdot 10^{-4}$	140 %	93 %	34 %
Escenario 9	$6,2 \cdot 10^{-4}$	141 %	96 %	59 %

En todos los escenarios del modelo OMITUS-IS se capturan los beneficios esperados en la relocalización de la población, en donde $\Delta IS(\%) = \frac{IS(OMITUS)}{IS(MITUS)}$.

Los tiempos de ejecución de este modelo están del orden de 350 minutos, dado a las múltiples iteraciones que se realizan para determinar las tarifas de subsidio o impuestos para la localización.

En los Figuras 5.42, 5.43 y 5.44 se muestran los escenarios agrupados por rango de valores para poder mostrar las diferencias que resultan de la aplicación de los modelos.

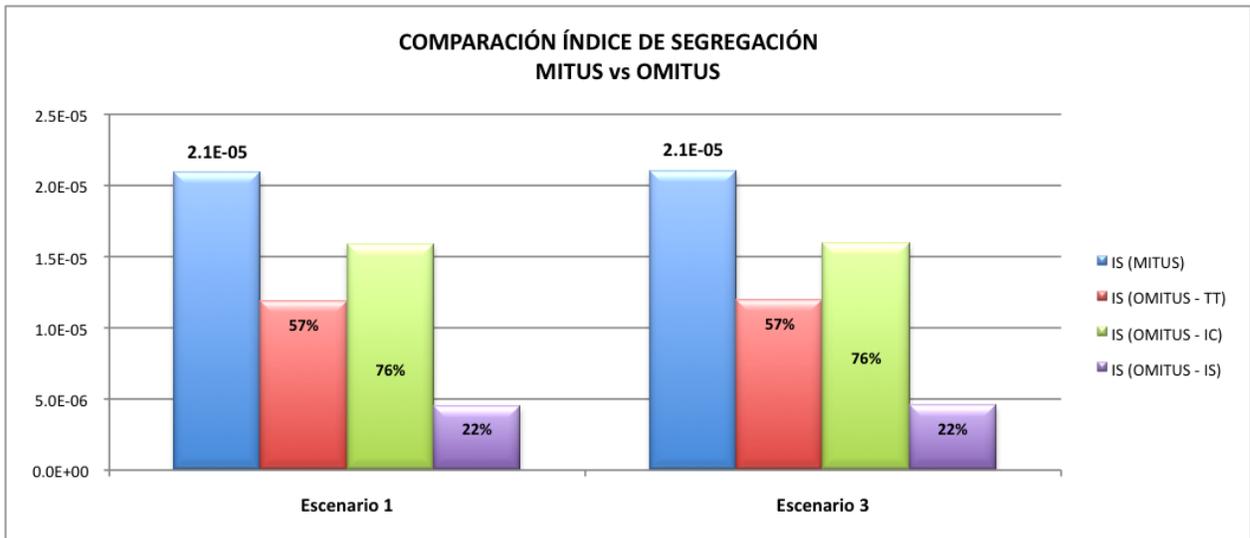


Figura 5.42: Gráfico IS1

5.5. Resumen de resultados

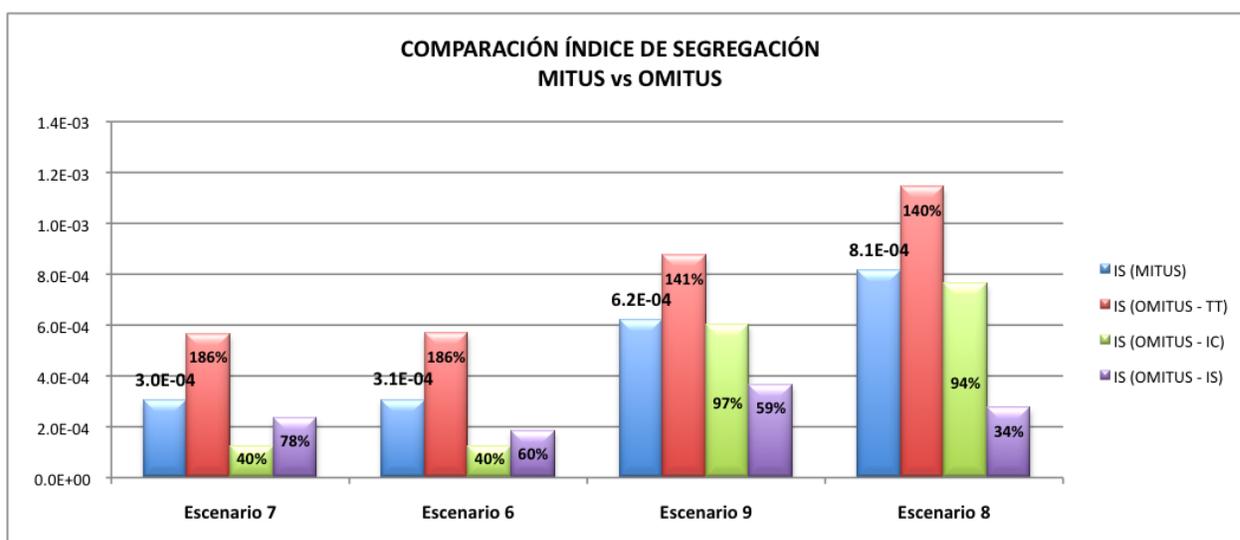


Figura 5.43: Gráfico IS2

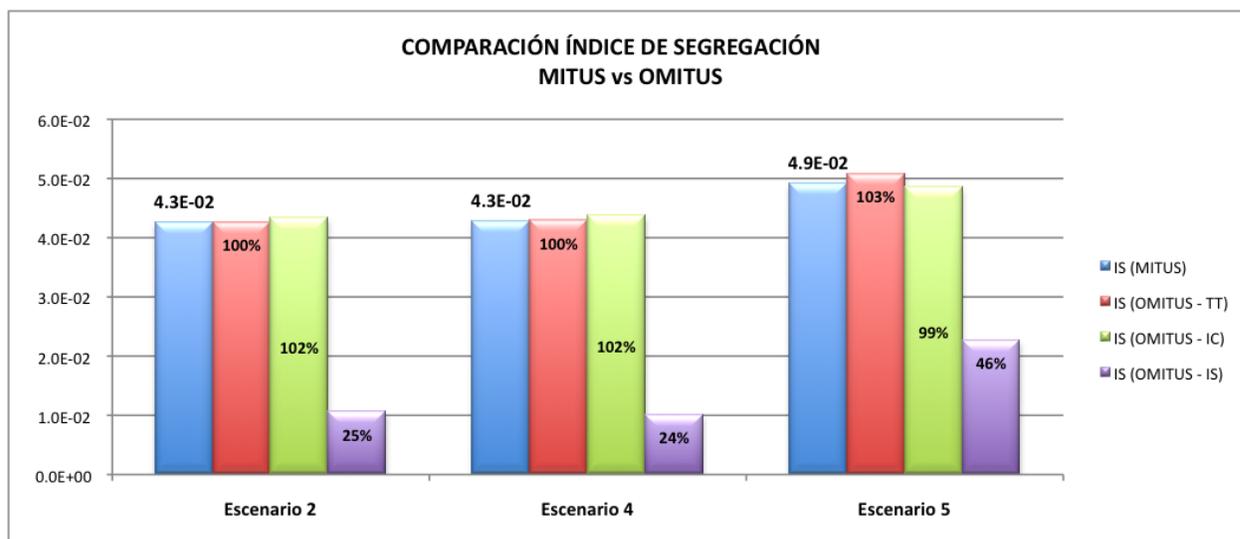


Figura 5.44: Gráfico IS3

5.5. Resumen de resultados

Tomado en consideración los resultados obtenidos, se llegó a los siguientes resultados, de la tabla (5.18)

Tabla 5.18: Resumen de resultados

Escenario	Δ TT(%)	Δ IC(%)	Δ IS(%)
Escenario 1	89%	73%	22%
Escenario 2	89%	73%	25%
Escenario 3	89%	73%	22%
Escenario 4	89%	73%	24%
Escenario 5	58%	79%	46%
Escenario 6	58%	79%	60%
Escenario 7	58%	79%	78%
Escenario 8	58%	79%	34%
Escenario 9	58%	79%	59%

La metodología permite reducciones porcentuales de TT, IC e IS similares respecto de su estado de equilibrio si μ_h es fijo; los cambios principales se verifican con el cambio de μ_h . También se observa que la variación porcentual de IC es más diversa que los otros indicadores (para un valor dado de μ_h).

En este capítulo se muestra como las distintas heurísticas planteadas permiten encontrar distintos resultados para los índices planteados, no siendo los mejores resultados en todos los casos para la heurística planteada. Como en el caso de OMITUS-TT no capta los mejores resultados para en índice TT en los escenario con baja congestión (Escenarios 1 al 4) donde se captan los mejores beneficios en OMITUS-IC, así mismo es posible observar en los casos de escenarios de mayor congestión (Escenarios 5 al 9) donde el índice IC capta mayores mejorías en el caso de OMITUS-TT en vez de OMITUS-IC.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras de investigación

En esta tesis se estudiaron modelos de optimización de políticas de uso de suelo y de transporte, a través de subsidios o impuestos para así lograr encontrar un equilibrio de ciudad con condiciones que le permitan acercarse al objetivo que proponga el planificador.

La decisión e implementación de políticas a largo plazo son elementos necesarios para el desarrollo de ciudades que tiendan a un desarrollo según los lineamientos estratégicos planteados por el planificador. Toma importancia la necesidad de una herramienta en favor de la planificación que agrupe tanto el uso de suelo como el transporte, dado que ambas están interconectadas pero muy pocas veces se trabajan en conjunto para lograr los objetivos planteados.

Para la optimización de transporte y de uso de suelo es necesario tener objetivos trabajados con un modelo de equilibrio integrado entre transporte y localización de sus individuos, el cual logre que las políticas lleven a alcanzar los objetivos planteados. Para esto, se trabajaron los diferentes modelos (OMITUS-TT mínimo tiempo total de la red, OMITUS-IC mínimo grado de saturación y OMITUS-IS mínima segregación socioeconómica), desarrollados para lograr implementar las políticas para alcanzar esos objetivos.

6.1. Equilibrio integrado de uso de suelo y transporte

Trabajar con un modelo integrado de transporte y uso de suelo permite encontrar un estado de equilibrio, considerando las interacciones entre la forma de transportarse y en la forma de localizarse.

A partir de este modelo integrado, se desarrollan modelos que busquen los objetivos planteados utilizando heurísticas diferentes en cada modelo. MITUS considera variables de transporte y de localización garantizando un equilibrio en el largo plazo en caso de mantener las condiciones planteadas.

Durante este trabajo se ha utilizado el modelo MITUS el cual muestra robustez en las simulaciones realizadas. Los resultados del equilibrio sin políticas para cada uno de los

índices, permitieron tener un punto de comparación para cuantificar el impacto de cada uno de los modelos en cada una de las simulaciones. Además se utilizó como base de la modelación realizada en OMITUS.

6.2. Políticas en transporte

Realizar una tarificación vial es una política ampliamente aceptada en el mundo técnico, pero no utilizada como política de descongestión. En esta tesis se trabajó esta política a través de la minimización de los tiempos totales (TT) donde el usuario percibe el costo total, es decir, el tiempo propio del usuario más la externalidad que produce, incluyendo la externalidad que produce como una tarifa o costo. Este modelo llega a un equilibrio integrado de transporte y uso de suelo, dado a la forma funcional que se trabaja, se garantiza solución la cual es única utilizando los argumentos de MITUS.

OMITUS-TT y OMITUS-IC permiten modelar y predecir la tarifa que debe ser cobrada en cada arco para generar un menor grado de saturación de los arcos y tiempos de viajes en la red de transporte de la ciudad. Estas políticas disminuyen los tiempos totales (TT) y la congestión (IC) en los escenarios analizados, no así con el IS, el cual tiene impactos positivos para algunos escenarios mientras que afecta de forma negativa para otros. Los resultados obtenidos con OMITUS-TT disminuyen a un 58 % el índice de tiempo total (TT) en los escenarios con TT altos, mientras que para los escenarios con TT bajos reduce aproximadamente a un 89 % (Tabla 5.15).

Por otro lado, al trabajar con el modelo OMITUS-IC es posible identificar que en los escenarios de menor congestión permite un impacto mayor del índice llegando a un 73 % y en los escenarios más congestionados se redujo en menor cantidad llegando a niveles de un 79 % del equilibrio inicial, es decir ambos se reducen sobre un 20 % de reducción aproximada según el criterio de parada determinado.

Ambos modelos nos permiten implementar políticas que lleven a una disminución de los índices relacionados con el transporte, pero no afectando la segregación espacial.

6.3. Políticas en uso de suelo

Incluir impuestos en la localización es algo que usualmente está asociado al valor de la vivienda y no considera el nivel de ingreso que tienen los hogares que la habitan. La política que actualmente está vigente en Chile para esto son las contribuciones, las cuales son pagadas en varias cuotas de forma anual y son cobradas al dueño de la vivienda. En caso que el objetivo tuviera como fin, no solo pagar impuestos por el hecho de poseer una vivienda en cierto sector, sino que tenga relación con las personas que habitan cada una de las viviendas, posibilita generar una visión que permita una localización mejorando el objetivo social de disminuir la segregación espacial (IS) en comparación a la aplicación de una tarifa por tipo de vivienda.

En el caso analizado, se buscan tarifas que permitan conseguir una relocalización de

los hogares que minimicen el índice de segregación (IS) para lograr así una localización lo más heterogénea posible en cada nodo. Esto fue realizado a través de impuestos o subsidios que consideran los diferentes tipos de hogares (5) y zonas (24) y permitió la obtención de impactos positivos tanto en la localización como en transporte y con esto reducir los tiempos de viajes y la congestión del sistema. Se produjo un impacto positivo en el índice de segregación para todos los escenarios, llegando a un 22 % para el caso que obtiene mayores beneficios y 78 % para el escenario que obtiene menores beneficios.

Con estos resultados es posible recomendar al planificador implementar políticas de subsidios e impuestos a la localización, teniendo como base un monto total disponible. Con esto se lograría aumentar las mejoras de los tres objetivos (TT, IC, IS) simultáneamente.

6.4. Formulación y resolución de OMITUS

Los modelos formulados y trabajados permiten la obtención de diferentes resultados para la ciudad analizada, la que corresponde a la red de Sioux Falls de 76 arcos, 24 nodos, y 5 tipos de hogares los cuales se diferencian según el nivel de ingreso. La metodología utilizada para resolver el modelo OMITUS-TT tiene la misma estructura que MITUS por lo tanto esta garantiza una solución única, mientras que los otros modelos OMITUS-IC y OMITUS-IS son resueltos a través de un método de punto fijo y siguiendo la estructura general de MITUS. La resolución a través del punto fijo no asegura una solución ni tampoco que sea única. Las modelaciones realizadas para OMITUS-IS están del orden de 300 minutos para cada escenario, OMITUS-IC son superiores a las 5 horas, mientras que OMITUS-TT encuentra solución en el orden de 5 minutos.

Finalmente, es posible expresar que las simulaciones en Sioux Falls permiten argumentar que una tarificación correcta en la localización que permitirá impactos mayores tanto en el objetivo de segregación, como en los impactos en transporte.

Como solo se trabajó en tres objetivos de prueba, es necesario ampliar la gama de funciones objetivos y así poder hacer las recomendaciones correctas, para orientar las decisiones del planificador a un desarrollo acorde con los objetivos seguidos.

6.5. Líneas futuras de investigación

Para continuar con la investigación de políticas que permitan llegar a un objetivo según los planteamientos del planificador es necesario contar con una calibración del modelo MITUS, para poder realizar planificación con un programa que vea de forma integrada modelos de transporte y de uso de suelo. Con esta herramienta será posible hacer una planificación urbana aplicando políticas que ayuden a alcanzar los objetivos e indicadores de calidad urbana.

Además es necesario continuar investigando la estructura de las funciones objetivos para que de esta forma OMITUS no esté limitado a los heurísticas analizadas. También es necesario continuar con la investigación para lograr heurísticas de solución más eficiente dado que en las simulaciones realizadas los modelos OMITUS-IC y OMITUS-IS tienen largos

6.5. Líneas futuras de investigación

tiempos de resolución como fue comentado en el capítulo 5 y es importante recordar que este último punto es realmente importante dado a que la red utilizada tiene 24 nodos y 76 arcos por lo que para que logre ser un modelo aplicable en políticas urbanas será necesario una optimización en el algoritmo de resolución.

Capítulo 7

Anexos

7.1. Iteraciones OMITUS-IC

Los siguientes gráficos muestran el comportamiento de la heurística OMITUS-IC en cada una de las iteraciones, mostrando el comportamiento del índice IC.

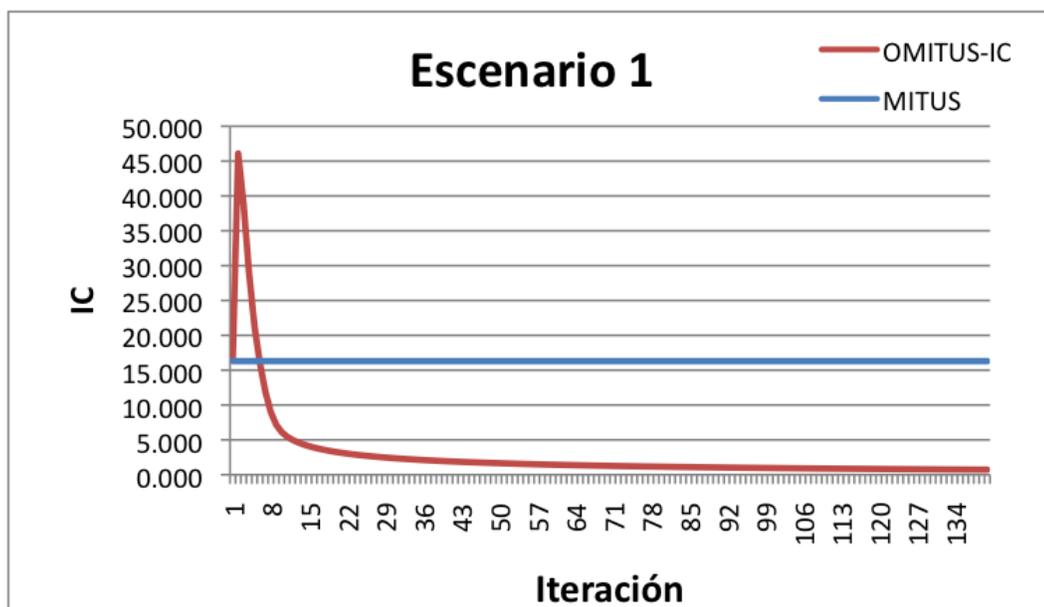


Figura 7.1: Escenario 1

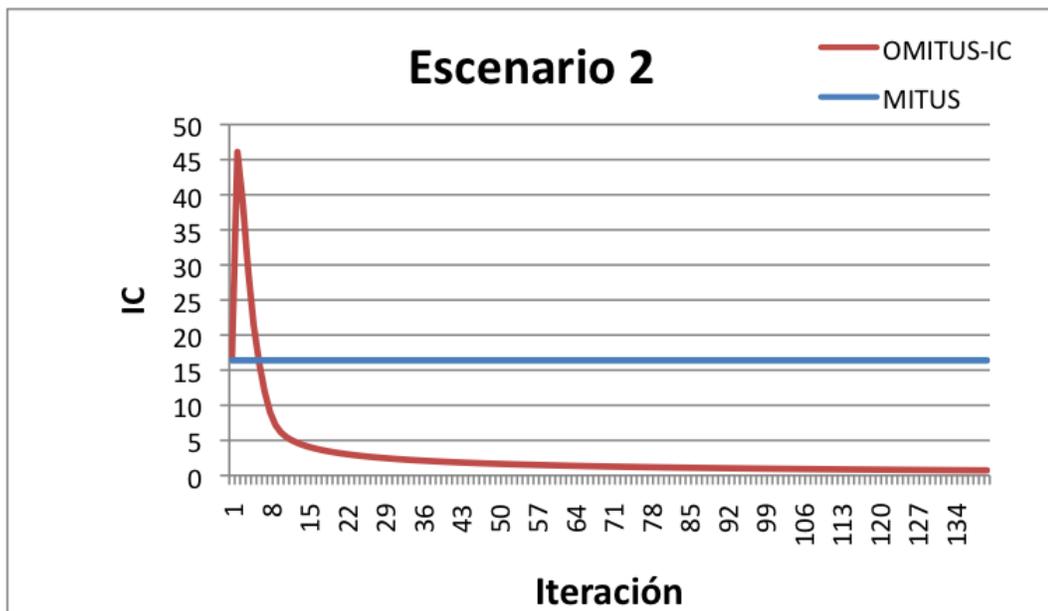


Figura 7.2: Escenario 2

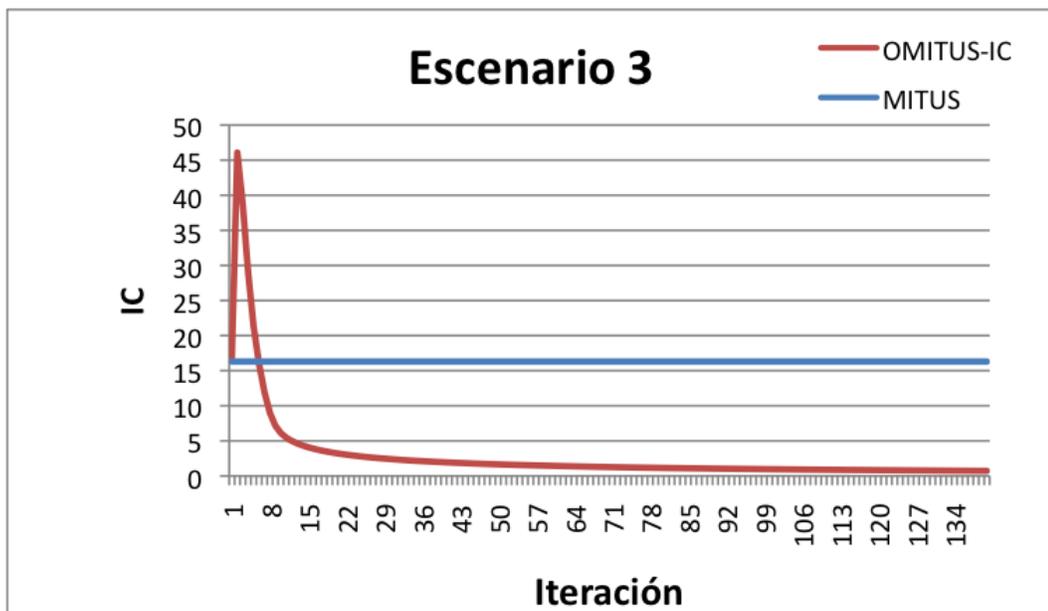


Figura 7.3: Escenario 3

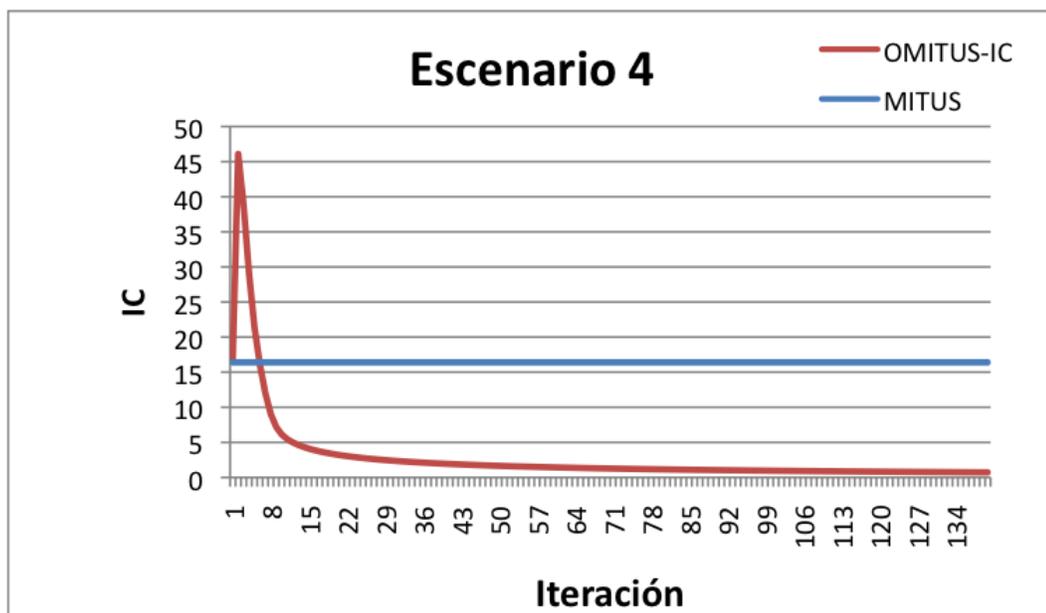


Figura 7.4: Escenario 4

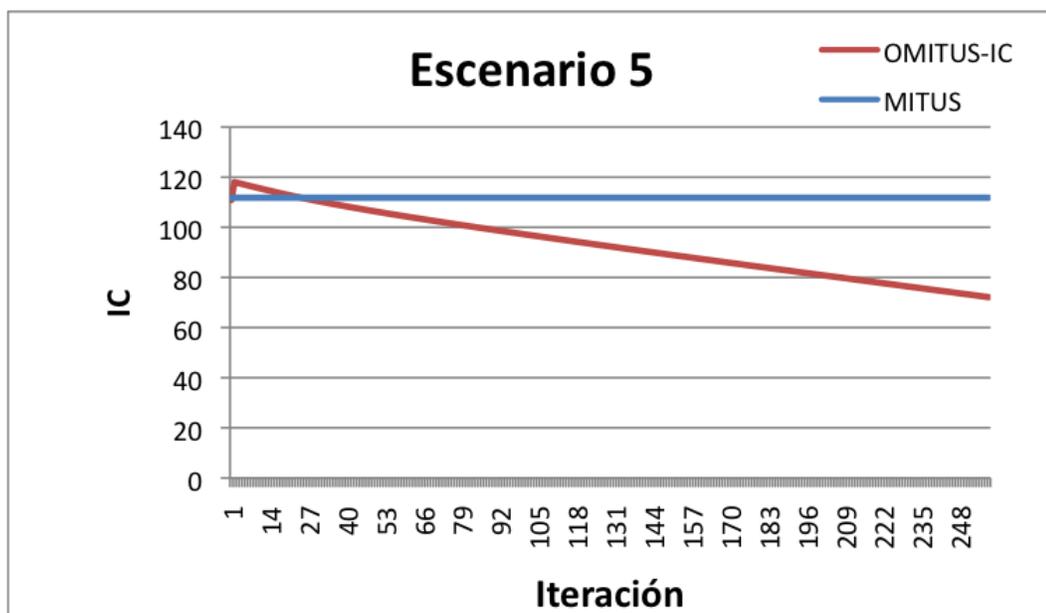


Figura 7.5: Escenario 5

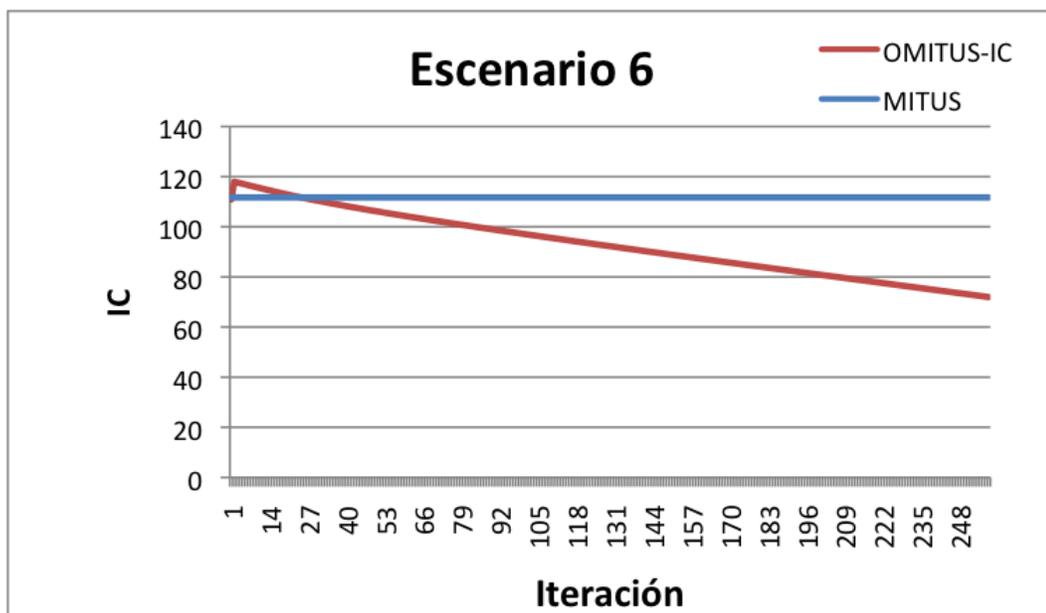


Figura 7.6: Escenario 6

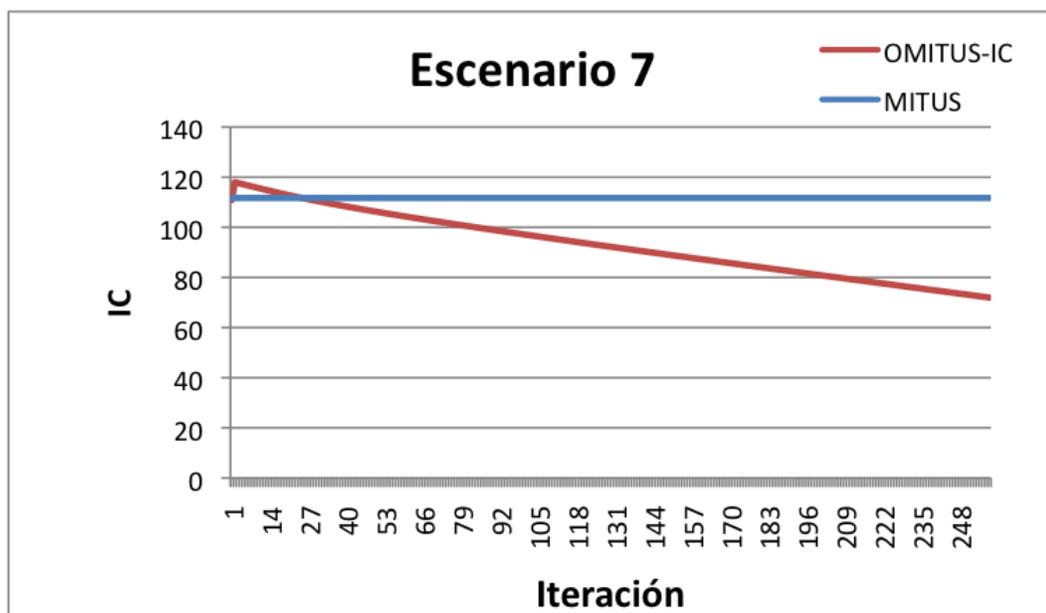


Figura 7.7: Escenario 7

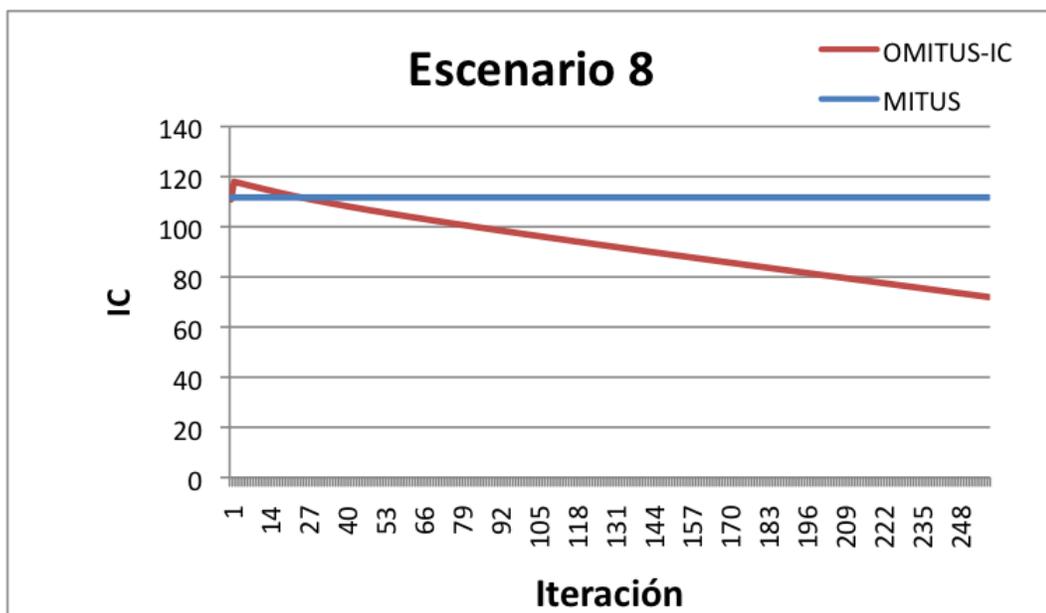


Figura 7.8: Escenario 8

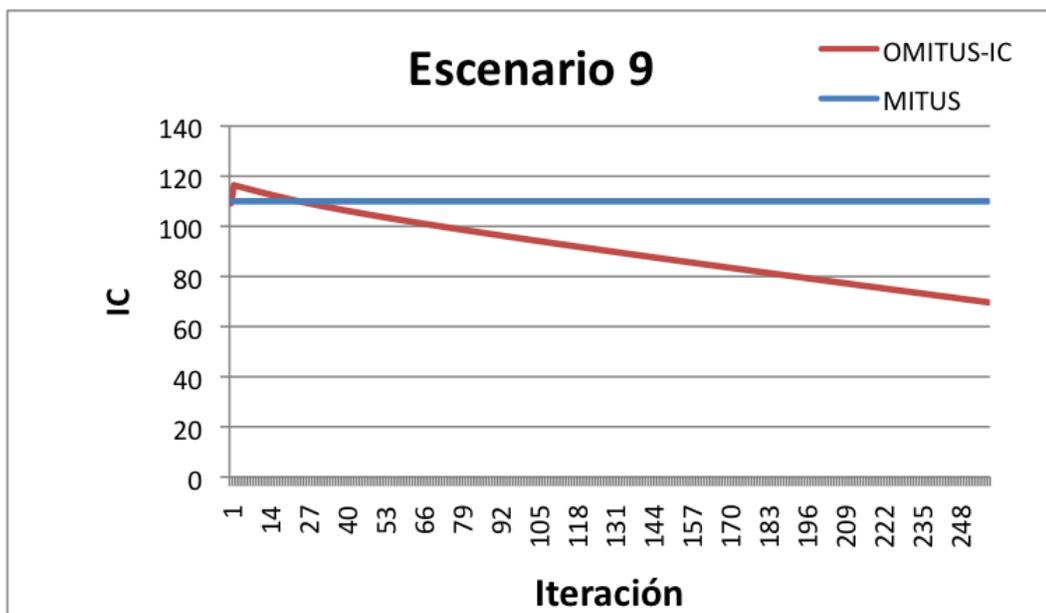


Figura 7.9: Escenario 9

El siguiente gráfico muestra el comportamiento de IC con la heurística en el escenario 5, el cual corresponde a un escenario de alta congestión. Muestra que se reduce el IC llegando a un 25 % aproximado de MITUS en donde deja de reducirse el índice.

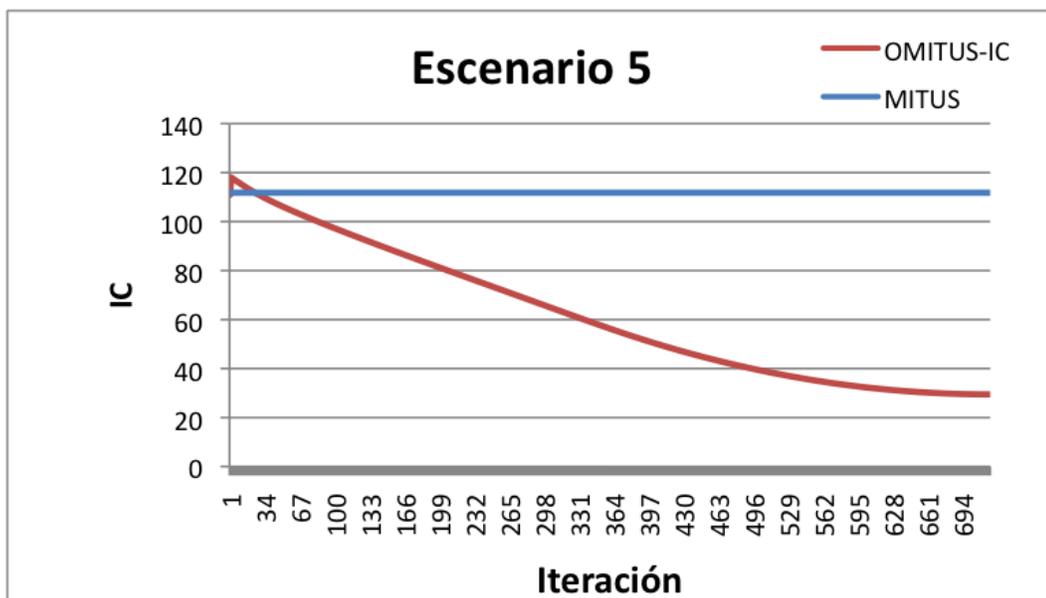


Figura 7.10: Escenario 5

7.2. Tarifas encontradas para escenario 1

Tabla 7.1: Tarifas aplicadas para el Escenario 1

q_{hi}	OMITUS IS					OMITUS IC					
	1	2	3	4	5	Arco	p_a	Arco	p_a	Arco	p_a
1	0.73	-1	-0.61	0.39	-1.28	1	-0.96	26	-0.04	51	-0.87
2	0.67	0.19	-1.9	-0.32	-0.62	2	-0.8	27	-0.55	52	0.15
3	0.63	-2.56	0.01	-0.39	0.28	3	-0.95	28	-0.58	53	0.03
4	0.56	0.35	-0.42	-1.88	-1.64	4	-0.69	29	0.15	54	0.92
5	-0.8	0.68	-2.29	-0.64	1.07	5	-0.76	30	-0.83	55	0.71
6	-0.38	0.09	-0.71	0.48	-3.07	6	-0.5	31	-0.7	56	-0.03
7	-0.96	0.67	0.61	-0.59	0.67	7	-0.62	32	-0.52	57	0.49
8	0.44	0.45	-0.65	-0.05	0.53	8	-0.33	33	-0.75	58	0.29
9	-0.96	-2.71	-0.63	-0.75	0.01	9	0.62	34	-0.22	59	0
10	-1.53	-0.26	-0.41	0.65	-0.7	10	-0.66	35	-0.61	60	-0.03
11	0.59	-1.08	0.22	0.57	-1.51	11	0.66	36	-0.76	61	0.1
12	0.66	-0.65	-1.1	0.5	-1.89	12	0.01	37	-0.4	62	-0.53
13	-1.56	-1.27	-1.28	-0.21	-0.08	13	-0.45	38	-0.35	63	-0.16
14	-0.95	0.63	-1.38	0.64	-0.09	14	-0.65	39	-0.11	64	-0.6
15	-0.24	-2.26	0.49	-0.78	0.33	15	-0.06	40	-0.2	65	0.45
16	0.23	0.73	0.28	-2	-1.29	16	0.38	41	-0.23	66	0.17
17	-0.78	-0.49	0.55	0.07	-0.27	17	0.29	42	0.07	67	0.65
18	-2.1	-2.01	-2.04	-0.82	0.73	18	1.03	43	-0.6	68	-0.22
19	-0.96	0.57	-0.52	0.59	-0.57	19	0.31	44	-0.32	69	0.55
20	-0.86	0.66	0.35	0.08	0.17	20	0.4	45	0.57	70	0.11
21	0.79	0.69	-1.35	0.61	-1.16	21	-0.95	46	0.72	71	-0.03
22	0.67	0.57	0.66	-2.72	0.39	22	-0.17	47	-0.25	72	0.19
23	-2.44	-0.59	0.28	-0.93	0.66	23	-0.55	48	0.03	73	0.5
24	-2.08	0.41	-1.15	-1.33	-1.46	24	-0.95	49	0.41	74	-0.14
						25	0	50	0.64	75	0.27
										76	0.42

7.3. Tarifas encontradas para escenario 2

Tabla 7.2: Tarifas aplicadas para el Escenario 2

OMITUS IS						OMITUS IC					
q_{hi}	1	2	3	4	5	Arco	p_a	Arco	p_a	Arco	p_a
1	0.73	-1	-0.61	0.39	-1.28	1	-0.96	26	-0.04	51	-0.87
2	0.67	0.19	-1.9	-0.32	-0.62	2	-0.81	27	-0.55	52	0.14
3	0.63	-2.56	0.01	-0.39	0.28	3	-0.95	28	-0.58	53	0.03
4	0.56	0.35	-0.42	-1.88	-1.64	4	-0.7	29	0.15	54	0.92
5	-0.8	0.68	-2.29	-0.64	1.07	5	-0.76	30	-0.83	55	0.71
6	-0.38	0.09	-0.71	0.48	-3.07	6	-0.51	31	-0.7	56	-0.03
7	-0.96	0.67	0.61	-0.59	0.67	7	-0.63	32	-0.52	57	0.49
8	0.44	0.45	-0.65	-0.05	0.53	8	-0.33	33	-0.75	58	0.29
9	-0.96	-2.71	-0.63	-0.75	0.01	9	0.62	34	-0.23	59	0
10	-1.53	-0.26	-0.41	0.65	-0.7	10	-0.66	35	-0.62	60	-0.04
11	0.59	-1.08	0.22	0.57	-1.51	11	0.66	36	-0.77	61	0.1
12	0.66	-0.65	-1.1	0.5	-1.89	12	0.01	37	-0.41	62	-0.53
13	-1.56	-1.27	-1.28	-0.21	-0.08	13	-0.45	38	-0.35	63	-0.16
14	-0.95	0.63	-1.38	0.64	-0.09	14	-0.65	39	-0.11	64	-0.6
15	-0.24	-2.26	0.49	-0.78	0.33	15	-0.06	40	-0.19	65	0.45
16	0.23	0.73	0.28	-2	-1.29	16	0.37	41	-0.22	66	0.16
17	-0.78	-0.49	0.55	0.07	-0.27	17	0.29	42	0.08	67	0.65
18	-2.1	-2.01	-2.04	-0.82	0.73	18	1.03	43	-0.6	68	-0.22
19	-0.96	0.57	-0.52	0.59	-0.57	19	0.3	44	-0.31	69	0.55
20	-0.86	0.66	0.35	0.08	0.17	20	0.4	45	0.57	70	0.11
21	0.79	0.69	-1.35	0.61	-1.16	21	-0.95	46	0.72	71	-0.03
22	0.67	0.57	0.66	-2.72	0.39	22	-0.17	47	-0.25	72	0.19
23	-2.44	-0.59	0.28	-0.93	0.66	23	-0.55	48	0.03	73	0.5
24	-2.08	0.41	-1.15	-1.33	-1.46	24	-0.95	49	0.41	74	-0.14
						25	0	50	0.64	75	0.27
										76	0.42

7.4. Tarifas encontradas para escenario 3

Tabla 7.3: Tarifas aplicadas para el Escenario 3

OMITUS IS						OMITUS IC					
q_{hi}	1	2	3	4	5	Arco	p_a	Arco	p_a	Arco	p_a
1	0.73	-1	-0.61	0.39	-1.28	1	-0.96	26	-0.04	51	-0.87
2	0.67	0.19	-1.9	-0.32	-0.62	2	-0.8	27	-0.55	52	0.15
3	0.63	-2.56	0.01	-0.39	0.28	3	-0.95	28	-0.58	53	0.03
4	0.56	0.35	-0.42	-1.88	-1.64	4	-0.69	29	0.15	54	0.92
5	-0.8	0.68	-2.29	-0.64	1.07	5	-0.76	30	-0.83	55	0.71
6	-0.38	0.09	-0.71	0.48	-3.07	6	-0.5	31	-0.7	56	-0.03
7	-0.96	0.67	0.61	-0.59	0.67	7	-0.62	32	-0.52	57	0.49
8	0.44	0.45	-0.65	-0.05	0.53	8	-0.33	33	-0.75	58	0.29
9	-0.96	-2.71	-0.63	-0.75	0.01	9	0.62	34	-0.22	59	0
10	-1.53	-0.26	-0.41	0.65	-0.7	10	-0.66	35	-0.61	60	-0.03
11	0.59	-1.08	0.22	0.57	-1.51	11	0.66	36	-0.76	61	0.1
12	0.66	-0.65	-1.1	0.5	-1.89	12	0.01	37	-0.4	62	-0.53
13	-1.56	-1.27	-1.28	-0.21	-0.08	13	-0.45	38	-0.35	63	-0.16
14	-0.95	0.63	-1.38	0.64	-0.09	14	-0.65	39	-0.11	64	-0.6
15	-0.24	-2.26	0.49	-0.78	0.33	15	-0.06	40	-0.2	65	0.45
16	0.23	0.73	0.28	-2	-1.29	16	0.38	41	-0.23	66	0.17
17	-0.78	-0.49	0.55	0.07	-0.27	17	0.29	42	0.07	67	0.65
18	-2.1	-2.01	-2.04	-0.82	0.73	18	1.03	43	-0.6	68	-0.22
19	-0.96	0.57	-0.52	0.59	-0.57	19	0.31	44	-0.32	69	0.55
20	-0.86	0.66	0.35	0.08	0.17	20	0.4	45	0.57	70	0.11
21	0.79	0.69	-1.35	0.61	-1.16	21	-0.95	46	0.72	71	-0.03
22	0.67	0.57	0.66	-2.72	0.39	22	-0.17	47	-0.25	72	0.19
23	-2.44	-0.59	0.28	-0.93	0.66	23	-0.55	48	0.03	73	0.5
24	-2.08	0.41	-1.15	-1.33	-1.46	24	-0.95	49	0.41	74	-0.14
						25	0	50	0.64	75	0.27
										76	0.42

7.5. Tarifas encontradas para escenario 4

Tabla 7.4: Tarifas aplicadas para el Escenario 4

OMITUS IS						OMITUS IC					
q_{hi}	1	2	3	4	5	Arco	p_a	Arco	p_a	Arco	p_a
1	0.73	-1	-0.61	0.39	-1.28	1	-0.96	26	-0.04	51	-0.87
2	0.67	0.19	-1.9	-0.32	-0.62	2	-0.81	27	-0.55	52	0.14
3	0.63	-2.56	0.01	-0.39	0.28	3	-0.95	28	-0.58	53	0.03
4	0.56	0.35	-0.42	-1.88	-1.64	4	-0.7	29	0.15	54	0.92
5	-0.8	0.68	-2.29	-0.64	1.07	5	-0.76	30	-0.83	55	0.71
6	-0.38	0.09	-0.71	0.48	-3.07	6	-0.51	31	-0.7	56	-0.03
7	-0.96	0.67	0.61	-0.59	0.67	7	-0.63	32	-0.52	57	0.49
8	0.44	0.45	-0.65	-0.05	0.53	8	-0.33	33	-0.75	58	0.29
9	-0.96	-2.71	-0.63	-0.75	0.01	9	0.62	34	-0.23	59	0
10	-1.53	-0.26	-0.41	0.65	-0.7	10	-0.66	35	-0.62	60	-0.04
11	0.59	-1.08	0.22	0.57	-1.51	11	0.66	36	-0.77	61	0.1
12	0.66	-0.65	-1.1	0.5	-1.89	12	0.01	37	-0.41	62	-0.53
13	-1.56	-1.27	-1.28	-0.21	-0.08	13	-0.45	38	-0.35	63	-0.16
14	-0.95	0.63	-1.38	0.64	-0.09	14	-0.65	39	-0.11	64	-0.6
15	-0.24	-2.26	0.49	-0.78	0.33	15	-0.06	40	-0.19	65	0.45
16	0.23	0.73	0.28	-2	-1.29	16	0.37	41	-0.22	66	0.16
17	-0.78	-0.49	0.55	0.07	-0.27	17	0.29	42	0.08	67	0.65
18	-2.1	-2.01	-2.04	-0.82	0.73	18	1.03	43	-0.6	68	-0.22
19	-0.96	0.57	-0.52	0.59	-0.57	19	0.3	44	-0.31	69	0.55
20	-0.86	0.66	0.35	0.08	0.17	20	0.4	45	0.57	70	0.11
21	0.79	0.69	-1.35	0.61	-1.16	21	-0.95	46	0.72	71	-0.03
22	0.67	0.57	0.66	-2.72	0.39	22	-0.17	47	-0.25	72	0.19
23	-2.44	-0.59	0.28	-0.93	0.66	23	-0.55	48	0.03	73	0.5
24	-2.08	0.41	-1.15	-1.33	-1.46	24	-0.95	49	0.41	74	-0.14
						25	0	50	0.64	75	0.27
										76	0.42

7.6. Tarifas encontradas para escenario 5

Tabla 7.5: Tarifas aplicadas para el Escenario 5

OMITUS IS						OMITUS IC					
q_{hi}	1	2	3	4	5	Arco	p_a	Arco	p_a	Arco	p_a
1	0.73	-1	-0.61	0.39	-1.28	1	1.59	26	5.09	51	3.42
2	0.67	0.19	-1.9	-0.32	-0.62	2	4.08	27	4.57	52	3.87
3	0.63	-2.56	0.01	-0.39	0.28	3	1.65	28	4.33	53	4.35
4	0.56	0.35	-0.42	-1.88	-1.64	4	2.27	29	3.16	54	5.17
5	-0.8	0.68	-2.29	-0.64	1.07	5	3.61	30	2.35	55	4.86
6	-0.38	0.09	-0.71	0.48	-3.07	6	5.25	31	2.4	56	6.9
7	-0.96	0.67	0.61	-0.59	0.67	7	4.92	32	4.66	57	5.43
8	0.44	0.45	-0.65	-0.05	0.53	8	5.02	33	2.4	58	3.36
9	-0.96	-2.71	-0.63	-0.75	0.01	9	6.41	34	2.54	59	3.27
10	-1.53	-0.26	-0.41	0.65	-0.7	10	3.68	35	4.72	60	4.85
11	0.59	-1.08	0.22	0.57	-1.51	11	5.87	36	2.94	61	2.78
12	0.66	-0.65	-1.1	0.5	-1.89	12	3.79	37	4.11	62	3.32
13	-1.56	-1.27	-1.28	-0.21	-0.08	13	4.66	38	4.32	63	2.76
14	-0.95	0.63	-1.38	0.64	-0.09	14	2.64	39	2.93	64	3.04
15	-0.24	-2.26	0.49	-0.78	0.33	15	2.14	40	3.15	65	2.89
16	0.23	0.73	0.28	-2	-1.29	16	2.69	41	2.85	66	3.06
17	-0.78	-0.49	0.55	0.07	-0.27	17	4.91	42	2.91	67	4.3
18	-2.1	-2.01	-2.04	-0.82	0.73	18	5.76	43	4.64	68	3.43
19	-0.96	0.57	-0.52	0.59	-0.57	19	4.25	44	2.6	69	3.86
20	-0.86	0.66	0.35	0.08	0.17	20	4.27	45	4.03	70	2.82
21	0.79	0.69	-1.35	0.61	-1.16	21	2.77	46	4.61	71	2.84
22	0.67	0.57	0.66	-2.72	0.39	22	2.93	47	3.75	72	3.41
23	-2.44	-0.59	0.28	-0.93	0.66	23	4.78	48	4.07	73	3.78
24	-2.08	0.41	-1.15	-1.33	-1.46	24	2.91	49	3.3	74	2.53
						25	6.02	50	4.12	75	3.34
										76	2.97

7.7. Tarifas encontradas para escenario 6

Tabla 7.6: Tarifas aplicadas para el Escenario 6

OMITUS IS						OMITUS IC					
q_{hi}	1	2	3	4	5	Arco	p_a	Arco	p_a	Arco	p_a
1	0.73	-1	-0.61	0.39	-1.28	1	1.62	26	5.07	51	3.43
2	0.67	0.19	-1.9	-0.32	-0.62	2	4.08	27	4.54	52	3.86
3	0.63	-2.56	0.01	-0.39	0.28	3	1.65	28	4.33	53	4.35
4	0.56	0.35	-0.42	-1.88	-1.64	4	2.25	29	3.15	54	5.17
5	-0.8	0.68	-2.29	-0.64	1.07	5	3.63	30	2.34	55	4.82
6	-0.38	0.09	-0.71	0.48	-3.07	6	5.28	31	2.38	56	6.84
7	-0.96	0.67	0.61	-0.59	0.67	7	4.92	32	4.63	57	5.45
8	0.44	0.45	-0.65	-0.05	0.53	8	5.02	33	2.38	58	3.38
9	-0.96	-2.71	-0.63	-0.75	0.01	9	6.44	34	2.48	59	3.28
10	-1.53	-0.26	-0.41	0.65	-0.7	10	3.65	35	4.74	60	4.84
11	0.59	-1.08	0.22	0.57	-1.51	11	5.87	36	2.9	61	2.79
12	0.66	-0.65	-1.1	0.5	-1.89	12	3.78	37	4.12	62	3.33
13	-1.56	-1.27	-1.28	-0.21	-0.08	13	4.65	38	4.31	63	2.76
14	-0.95	0.63	-1.38	0.64	-0.09	14	2.66	39	2.91	64	3.04
15	-0.24	-2.26	0.49	-0.78	0.33	15	2.16	40	3.21	65	2.88
16	0.23	0.73	0.28	-2	-1.29	16	2.67	41	2.91	66	3.07
17	-0.78	-0.49	0.55	0.07	-0.27	17	4.99	42	2.99	67	4.31
18	-2.1	-2.01	-2.04	-0.82	0.73	18	5.71	43	4.65	68	3.44
19	-0.96	0.57	-0.52	0.59	-0.57	19	4.34	44	2.63	69	3.89
20	-0.86	0.66	0.35	0.08	0.17	20	4.32	45	4.05	70	2.84
21	0.79	0.69	-1.35	0.61	-1.16	21	2.82	46	4.66	71	2.84
22	0.67	0.57	0.66	-2.72	0.39	22	3.01	47	3.74	72	3.42
23	-2.44	-0.59	0.28	-0.93	0.66	23	4.79	48	4.08	73	3.81
24	-2.08	0.41	-1.15	-1.33	-1.46	24	2.92	49	3.32	74	2.53
						25	6.05	50	4.11	75	3.33
										76	2.96

7.8. Tarifas encontradas para escenario 7

Tabla 7.7: Tarifas aplicadas para el Escenario 7

q_{hi}	OMITUS IS					OMITUS IC					
	1	2	3	4	5	Arco	p_a	Arco	p_a	Arco	p_a
1	0.73	-1	-0.61	0.39	-1.28	1	1.62	26	5.07	51	3.43
2	0.67	0.19	-1.9	-0.32	-0.62	2	4.08	27	4.54	52	3.86
3	0.63	-2.56	0.01	-0.39	0.28	3	1.65	28	4.33	53	4.35
4	0.56	0.35	-0.42	-1.88	-1.64	4	2.25	29	3.15	54	5.17
5	-0.8	0.68	-2.29	-0.64	1.07	5	3.63	30	2.34	55	4.82
6	-0.38	0.09	-0.71	0.48	-3.07	6	5.28	31	2.38	56	6.84
7	-0.96	0.67	0.61	-0.59	0.67	7	4.92	32	4.63	57	5.45
8	0.44	0.45	-0.65	-0.05	0.53	8	5.02	33	2.38	58	3.38
9	-0.96	-2.71	-0.63	-0.75	0.01	9	6.44	34	2.48	59	3.28
10	-1.53	-0.26	-0.41	0.65	-0.7	10	3.65	35	4.74	60	4.84
11	0.59	-1.08	0.22	0.57	-1.51	11	5.87	36	2.9	61	2.79
12	0.66	-0.65	-1.1	0.5	-1.89	12	3.78	37	4.12	62	3.33
13	-1.56	-1.27	-1.28	-0.21	-0.08	13	4.65	38	4.31	63	2.76
14	-0.95	0.63	-1.38	0.64	-0.09	14	2.66	39	2.91	64	3.04
15	-0.24	-2.26	0.49	-0.78	0.33	15	2.16	40	3.21	65	2.88
16	0.23	0.73	0.28	-2	-1.29	16	2.67	41	2.91	66	3.07
17	-0.78	-0.49	0.55	0.07	-0.27	17	4.99	42	2.99	67	4.31
18	-2.1	-2.01	-2.04	-0.82	0.73	18	5.71	43	4.65	68	3.44
19	-0.96	0.57	-0.52	0.59	-0.57	19	4.34	44	2.63	69	3.89
20	-0.86	0.66	0.35	0.08	0.17	20	4.32	45	4.05	70	2.84
21	0.79	0.69	-1.35	0.61	-1.16	21	2.82	46	4.66	71	2.84
22	0.67	0.57	0.66	-2.72	0.39	22	3.01	47	3.74	72	3.42
23	-2.44	-0.59	0.28	-0.93	0.66	23	4.79	48	4.08	73	3.81
24	-2.08	0.41	-1.15	-1.33	-1.46	24	2.92	49	3.32	74	2.53
						25	6.05	50	4.11	75	3.33
										76	2.96

7.9. Tarifas encontradas para escenario 8

Tabla 7.8: Tarifas aplicadas para el Escenario 8

q_{hi}	OMITUS IS					OMITUS IC					
	1	2	3	4	5	Arco	p_a	Arco	p_a	Arco	p_a
1	0.73	-1	-0.61	0.39	-1.28	1	1.62	26	5.07	51	3.43
2	0.67	0.19	-1.9	-0.32	-0.62	2	4.08	27	4.54	52	3.86
3	0.63	-2.56	0.01	-0.39	0.28	3	1.65	28	4.33	53	4.35
4	0.56	0.35	-0.42	-1.88	-1.64	4	2.26	29	3.15	54	5.17
5	-0.8	0.68	-2.29	-0.64	1.07	5	3.63	30	2.34	55	4.82
6	-0.38	0.09	-0.71	0.48	-3.07	6	5.27	31	2.38	56	6.85
7	-0.96	0.67	0.61	-0.59	0.67	7	4.92	32	4.63	57	5.45
8	0.44	0.45	-0.65	-0.05	0.53	8	5.02	33	2.39	58	3.39
9	-0.96	-2.71	-0.63	-0.75	0.01	9	6.43	34	2.48	59	3.28
10	-1.53	-0.26	-0.41	0.65	-0.7	10	3.65	35	4.74	60	4.84
11	0.59	-1.08	0.22	0.57	-1.51	11	5.87	36	2.9	61	2.78
12	0.66	-0.65	-1.1	0.5	-1.89	12	3.78	37	4.12	62	3.33
13	-1.56	-1.27	-1.28	-0.21	-0.08	13	4.65	38	4.31	63	2.76
14	-0.95	0.63	-1.38	0.64	-0.09	14	2.65	39	2.91	64	3.04
15	-0.24	-2.26	0.49	-0.78	0.33	15	2.16	40	3.21	65	2.88
16	0.23	0.73	0.28	-2	-1.29	16	2.67	41	2.91	66	3.07
17	-0.78	-0.49	0.55	0.07	-0.27	17	4.99	42	2.99	67	4.3
18	-2.1	-2.01	-2.04	-0.82	0.73	18	5.71	43	4.65	68	3.44
19	-0.96	0.57	-0.52	0.59	-0.57	19	4.33	44	2.63	69	3.89
20	-0.86	0.66	0.35	0.08	0.17	20	4.31	45	4.06	70	2.83
21	0.79	0.69	-1.35	0.61	-1.16	21	2.82	46	4.66	71	2.84
22	0.67	0.57	0.66	-2.72	0.39	22	3	47	3.74	72	3.42
23	-2.44	-0.59	0.28	-0.93	0.66	23	4.79	48	4.08	73	3.81
24	-2.08	0.41	-1.15	-1.33	-1.46	24	2.92	49	3.31	74	2.53
						25	6.05	50	4.12	75	3.33
										76	2.96

7.10. Tarifas encontradas para escenario 9

Tabla 7.9: Tarifas aplicadas para el Escenario 9

q_{hi}	OMITUS IS					OMITUS IC					
	1	2	3	4	5	Arco	p_a	Arco	p_a	Arco	p_a
1	0.73	-1	-0.61	0.39	-1.28	1	1.44	26	4.92	51	3.41
2	0.67	0.19	-1.9	-0.32	-0.62	2	3.8	27	4.44	52	3.83
3	0.63	-2.56	0.01	-0.39	0.28	3	1.45	28	4.2	53	4.33
4	0.56	0.35	-0.42	-1.88	-1.64	4	2.16	29	3.1	54	4.98
5	-0.8	0.68	-2.29	-0.64	1.07	5	3.39	30	2.27	55	4.61
6	-0.38	0.09	-0.71	0.48	-3.07	6	5.03	31	2.35	56	6.58
7	-0.96	0.67	0.61	-0.59	0.67	7	4.68	32	4.55	57	5.33
8	0.44	0.45	-0.65	-0.05	0.53	8	4.81	33	2.33	58	3.34
9	-0.96	-2.71	-0.63	-0.75	0.01	9	6.27	34	2.43	59	3.21
10	-1.53	-0.26	-0.41	0.65	-0.7	10	3.58	35	4.49	60	4.62
11	0.59	-1.08	0.22	0.57	-1.51	11	5.67	36	2.85	61	2.73
12	0.66	-0.65	-1.1	0.5	-1.89	12	3.73	37	3.92	62	3.27
13	-1.56	-1.27	-1.28	-0.21	-0.08	13	4.55	38	4.09	63	2.7
14	-0.95	0.63	-1.38	0.64	-0.09	14	2.61	39	2.84	64	3
15	-0.24	-2.26	0.49	-0.78	0.33	15	2.09	40	3.19	65	2.85
16	0.23	0.73	0.28	-2	-1.29	16	2.59	41	2.88	66	3.04
17	-0.78	-0.49	0.55	0.07	-0.27	17	4.87	42	2.94	67	4.22
18	-2.1	-2.01	-2.04	-0.82	0.73	18	5.54	43	4.49	68	3.43
19	-0.96	0.57	-0.52	0.59	-0.57	19	4.28	44	2.58	69	3.79
20	-0.86	0.66	0.35	0.08	0.17	20	4.22	45	3.9	70	2.8
21	0.79	0.69	-1.35	0.61	-1.16	21	2.74	46	4.52	71	2.81
22	0.67	0.57	0.66	-2.72	0.39	22	2.97	47	3.66	72	3.41
23	-2.44	-0.59	0.28	-0.93	0.66	23	4.67	48	4.01	73	3.75
24	-2.08	0.41	-1.15	-1.33	-1.46	24	2.87	49	3.24	74	2.49
						25	5.94	50	3.96	75	3.3
										76	2.88

Bibliografía

- ÁGUILA, F. *Modelo Operativo de Planificación Óptima de Subsidios en Sistemas Urbanos*. Tesis de Magíster, Departamento de ingeniería Civil, Universidad de Chile, 2006.
- ALONSO, W. *Location and land use: towards a general theory of land rent*. Harvard University Press, 1964.
- ANAS, A. *Residential Location Markets and Urban Transportation : Economic theory, econometrics and policy analysis with discrete choice models*. Academic Press, New York, 1982.
- BAILLON, J.-B. y COMINETTI, R. Markovian traffic equilibrium. *Mathematical Programming*, vol. 111, páginas 33–56, 2006.
- BRAVO, M., COMINETTI, R., CORTÉS, C. y MARTÍNEZ, F. An integrated behavioral model of the land-use and transport systems with network congestion and location externalities. *Transportation Research Part B*, vol. 44, páginas 584–596, 2010.
- BRICEÑO, L., COMINETTI, R., CORTES, C. y MARTÍNEZ, F. An integrated behavioral model of land use and transport system: A hyper-network equilibrium approach. *Networks and Spatial Economics*, vol. 8, páginas 201–224, 2008.
- MA, X. y LO, H. Modeling transport management and land use over time. *Transportation Research Part B*, vol. 46(6), páginas 687–709, 2012.
- MARTÍNEZ, F. The bid choice land-use model - an integrated economic framework. *Environment and Planning A*, vol. 24, páginas 871–885, 1992.
- MARTÍNEZ, F. y DONOSO, P. *The MUSSA II Land use auction equilibrium model, in Residential Location Choice: Models and Applications*. Eds. J. Preston, D. Simmonds and F. Pagliara, Capítulo 4. Springer, 2010.
- MARTÍNEZ, F. y HENRÍQUEZ, R. A random bidding and supply land use equilibrium model. *Transportation Research B*, vol. 41, páginas 632–651, 2007.
- MARTÍNEZ, F. y ROY, R. J. A model for residential supply. *The Annals of Regional Science*, vol. 38, páginas 531–550, 2004.

- McFADDEN, D. *Spatial Interaction Theory and Planning Models*, capítulo Modelling the choice of residential location, páginas 75–96. 1978.
- ROSSI-HANSBERG, E. Optimal urban land use and zoning. *Review of Economic Dynamics*, vol. 7, páginas 69–106, 2004.
- SHEFFI, Y. *Urban Transportation Networks*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1984.
- VERHOEF, E. y NIJKAMP, P. Externalities in urban sustainability environmental versus localization-type agglomeration externalities in a general spatial equilibrium model of a single-sector monocentric industrial city. *Ecological Economics*, vol. 40, páginas 157–179, 2002.