



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Generación de recorridos alimentadores para sistemas de transporte público

Autores: Matías Dornel, Nicolas Erlichman

Supervisor: Antonio Mauttone

Proyecto de Grado en Ingeniería en Computación

Departamento de Investigación Operativa

Instituto de Computación

Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

Montevideo – Uruguay

Noviembre 2020

Resumen

En este trabajo se estudia el diseño de los recorridos en sistemas de transporte público con estructura jerárquica, donde se identifican al menos dos niveles que difieren significativamente en el nivel de servicio que brindan a los usuarios en términos de tiempo de viaje a bordo. Este tipo de sistemas ha surgido como una solución a los requerimientos de movilidad en ciudades medianas y grandes, mediante la integración de diferentes subsistemas complementarios, que difieren en sus características de operación. En particular se hace foco en sistemas donde se identifica una red de recorridos denominados troncales (que proveen transporte rápido) y otra red de recorridos denominados alimentadores, que complementan el sistema de transporte público, transportando usuarios desde y hacia la red troncal. El principal objetivo del trabajo es evaluar el efecto de parámetros de la red troncal (especialmente la velocidad de las unidades de transporte) sobre la red óptima de recorridos alimentadores. Para lograr el objetivo planteado se introduce el EFBNDP (*Extended Feeder Bus Network Design Problem -Problema Extendido del Diseño de la Red Alimentadora-*), el cual extiende el *Feeder Bus Network Design Problem* (conocido como FBNDP), que consiste en diseñar un conjunto de recorridos de ómnibus y determinar la frecuencia de servicio en cada recorrido, para minimizar la suma de los costos del operador y del usuario en una red jerárquica. Dicha extensión además se centra en considerar la naturaleza interzonal de la demanda de viajes por transporte público y en la extensión del concepto de recorridos alimentadores con el fin de abarcar recorridos denominados de segundo nivel (recorridos que satisfacen demanda de viajes sin hacer uso de la red troncal necesariamente). Este problema se resuelve heurísticamente mediante una extensión propuesta del PIA (*Pair Insertion Algorithm -Algoritmo de Inserción de Pares-*). La metodología propuesta se valida con casos ficticios y se aplica a un caso real relativo a la ciudad de Montevideo, para cuya construcción fue necesario realizar un procesamiento no trivial de los datos geográficos, en particular de la red de calles. Se realizan experimentos computacionales que buscan observar cómo cambia la red alimentadora, ante cambios en parámetros operacionales de la red troncal y parámetros de diseño de la red alimentadora. Se observa el efecto tanto para los usuarios como para los operadores.

Palabras clave: Transporte público, sistema de transporte bimodal, generación de recorridos alimentadores, FBNDP, EFBNDP.

Índice General

1. Introducción	1
1.1 Motivación y antecedentes.....	4
1.2 Objetivos y alcance del trabajo.....	6
1.3 Resultados y aportes del trabajo	7
1.4 Estructura del informe	8
2. Presentación del problema	9
2.1 Feeder Bus Network Design Problem	9
2.2 Extended Feeder Bus Network Design Problem (EFBDNP).....	9
2.3 Red	10
2.4 Red troncal.....	10
2.5 Demanda.....	11
2.6 Hipótesis de trabajo.....	11
2.7 Función objetivo	12
2.8 Modelo propuesto para el EFBDNP	13
3. Presentación del algoritmo de resolución	15
3.1 Pair Insertion Algorithm.....	16
3.2 Extended Pair Insertion Algorithm (EPIA).....	18
3.3 Implementación del algoritmo	21
3.3.1 Metadatos a nivel de implementación	22
Nodo	22
Arista.....	22
3.4 Detalles relevantes de implementación	23
4. Validación del algoritmo	25
4.1 Red de casos de prueba.....	25
4.2 Casos de prueba.....	27
4.2.1 Recorridos de segundo nivel y recorridos totalmente incluidos en red troncal.....	28
4.2.2 Efecto de la velocidad de la red troncal.....	29
4.2.3 Inserción de pares.....	30
4.2.4 Orden en el procesamiento de pares origen-destino.....	32
4.2.5 Efecto del costo máximo permitido por recorrido (CM).....	34
4.2.6 Efecto de la restricción cíclica (RC)	36

4.2.7	Visualización de recorridos para zona de prueba	37
5.	Caso de estudio	39
5.1	Construcción del caso	40
5.1.1	Zonificación de la región de estudio	40
5.1.2	Construcción de la matriz origen-destino	42
5.1.3	Construcción de la red	43
5.1.4	Línea Base	45
5.2	Componente de análisis de resultados	45
5.2.1	Métricas de Función Objetivo	46
5.2.2	Métricas de Recorridos	46
5.2.3	Métricas de Cubrimiento	47
5.2.4	Métricas de Clasificación de Viajes	47
5.2.5	Métricas de Flujo.....	48
5.3	Plan de pruebas	49
5.4	Resultados.....	51
5.4.1	Situación Actual	51
5.4.2	Red Troncal sin beneficio de velocidad.....	51
5.4.3	Línea Base	53
5.4.4	Velocidad relativa: 2x.....	54
5.4.5	Velocidad relativa: 2,5x.....	55
5.4.6	Velocidad relativa: 5x.....	56
5.4.7	Costo Máximo: 38km	57
5.4.8	Costo Máximo: 20km	58
5.4.9	Costo Máximo: 30km	59
5.4.10	Restricción Cíclica: 2,5km.....	60
5.4.11	Costo Máximo: 20 km, Velocidad Relativa: 2x.....	61
5.4.12	Costo Máximo: 30 km, Velocidad Relativa: 2x.....	62
5.4.13	Costo Máximo: 30 km, Velocidad Relativa: 2x, Restricción Cíclica: 2,5 km	63
5.4.14	Costo Máximo: 20 km, Velocidad Relativa: 2,5x, Restricción Cíclica: 2,5 km	64
5.4.15	Costo Máximo: 38 km, Velocidad Relativa: 2x.....	65
5.4.16	Costo Máximo: 20 km, Velocidad Relativa: 2,5x.....	66
5.4.17	Costo Máximo: 30 km, Velocidad Relativa: 2,5x.....	67
5.4.18	Costo Máximo: 38 km, Velocidad Relativa: 2,5x.....	68
5.4.19	Tabla de resultados.....	69
5.5	Análisis de resultados	71

5.5.1	Incidencia del factor velocidad relativa	71
5.5.2	Incidencia del factor costo máximo	73
5.5.3	Incidencia del factor restricción cíclica	75
5.5.4	Incidencia de Múltiples factores	76
5.6	Síntesis de análisis de resultados.....	82
6.	Resumen, conclusiones y trabajo a futuro	83
6.1	Resumen	83
6.2	Fuentes de dificultad.....	83
6.2.1	Definición del problema.....	84
6.2.2	Procesamiento de la información de la red vial.....	84
6.2.3	Procesamiento y transformación de datos para generación de la matriz OD.....	84
6.3	Conclusiones	84
6.4	Trabajo a futuro	85
6.4.1	Modelo	85
6.4.2	Estandarización de datos de entrada y salida.....	86
6.4.3	Algoritmo	86
	Referencias	87
	I. Generación de Matriz origen-destino	91
	II. Construcción de la Red	95
	Índice de Ilustraciones	99
	Índice de Tablas	101

Introducción

La necesidad de traslado está presente en todas las sociedades de cualquier ciudad del mundo. Los ciudadanos precisan trasladarse de un punto a otro de la ciudad para realizar sus actividades, ya sea por trabajo, educación, salud, ocio, entre otros. En ciudades de mediano y gran porte, el sistema de transporte público ofrece una solución adecuada a esta necesidad, principalmente cuando los desplazamientos a pie no son viables o como una alternativa frente al transporte privado (autos particulares). El sistema de transporte urbano juega un rol importante en la vida de las personas y es un elemento fundamental de cualquier ciudad.

En ciudades grandes, principalmente, los sistemas de transporte público han evolucionado hacia estructuras jerárquicas que incluyen modos específicos (por ejemplo, trenes urbanos) para conectar rápidamente puntos de la ciudad relativamente alejados y con alta demanda de viajes. Para las otras necesidades de desplazamientos (las que tienen menor demanda) se utilizan modos complementarios (por ejemplo, ómnibus) que en general son menos rápidos y directos, pero son más flexibles, ya que están definidos sobre la red de calles existente y la infraestructura adicional necesaria es mínima (por ejemplo, construcción de paradas), lo que permite introducir más fácilmente cambios y ajustes en los recorridos [1]. En este contexto, el transporte multimodal, es decir, usar dos o más modos para realizar un viaje, es la forma de traslado habitual que realizan los usuarios del sistema de transporte público. Un ejemplo típico es el uso de una línea de bus local hasta llegar a la estación de metro o tren elevado, para después recorrer una larga distancia en este último.

El transporte multimodal entonces, supone que un modo o servicio de transporte es usado para cubrir la mayoría de la distancia del viaje, mientras que otros modos son utilizados para alcanzar o dejar el modo principal. Por lo tanto, este comportamiento sugiere una mirada jerárquica sobre los sistemas de transporte, y por ende, de las propias redes de transporte.

Antes de continuar con nuevas definiciones, resulta necesario en este punto remarcar la distinción entre los conceptos de *red de transporte público* y *sistema de transporte público* y la percepción que tienen los usuarios sobre las mismas. El *sistema* de transporte público puede entenderse como el conjunto de infraestructura, tecnología e información que ofrece la posibilidad de traslado de pasajeros en un espacio urbano. Mientras que, por otro lado, la *red* de transporte público describe la relación espacial y temporal entre líneas de conexión provistas por el sistema. Es entonces que, para los usuarios, la red de transporte público es la superposición de líneas (que también llamaremos “recorridos”), es decir, servicios de conexión entre distintos puntos que operan con cierta frecuencia sobre el sistema de transporte. Un ejemplo se puede ver en la *Ilustración 1*, donde se tienen líneas y estaciones de metro, que se comunican con recorridos de ómnibus. Una jerarquía en redes de transporte implica que existen distintos niveles dentro de la red (usualmente representada mediante un grafo, donde los nodos representan intersección de calles y/o puntos de interés y las aristas que representan una conexión entre dichos nodos), cada uno adecuado para cubrir distancias y demandas específicas, y a su vez, ofrecer acceso a otros niveles de la red. Un ejemplo de jerarquía típica en la que se pueden categorizar los distintos tipos de líneas es la presentada en [2]:

- *Conexión interzonal de Alta velocidad/Gran capacidad*: también llamadas líneas troncales, líneas rápidas, dedicadas a mover altos volúmenes de pasajeros y de accesos limitados (paradas espaciadas y fijas). Metros, trenes elevados y BRTs (Bus Rapid Transit) son utilizados para este propósito.
- *Conexión Inter-Sub urbana*: son líneas utilizadas para conectar líneas de alta velocidad con nodos distantes de gran actividad como pueden ser centros comerciales, de salud, etc. Un ejemplo de esta categoría se puede ver en ciudades de gran tamaño donde se tiene por un lado la ciudad principal (el centro) y por otra parte una serie de “ciudades satélites”, las cuales calificarían como nodos distantes de gran actividad.
- *Conexión local*: son líneas utilizadas para conectar nodos poblados con líneas troncales o inter-sub urbanas. Sirven para cubrir viajes de corta distancia entre nodos y proveer de acceso a niveles superiores de la red.

Dentro de las jerarquías típicas en las que se categorizan las redes de transporte público, la más simple de todas es la categorización en primer y segundo nivel. Las líneas de primer nivel son las líneas troncales, dedicadas a mover altos volúmenes de pasajeros a “gran velocidad”. En la categorización anterior, las *Conexiones interzonal de Alta velocidad/Gran capacidad* se considera una línea de primer nivel. Por otro lado, se encuentran las líneas de segundo nivel, que se componen de todo el resto de las líneas que no se consideran de primer nivel. Se caracterizan por transportar menor cantidad de pasajeros utilizando medios de transporte menos veloces (comparados con los de primer nivel). En la categorización anterior, tanto las *Conexiones Inter-Sub urbanas* como las *Conexiones locales* se consideran líneas de segundo nivel. A su vez, estos recorridos de segundo nivel pueden ser subclasificados en alimentadores o no, según si su objetivo es transportar pasajeros desde un punto de demanda hacia un punto de conexión de una red de primer nivel, o viceversa; en cambio las redes de segundo nivel no alimentadoras son aquellas que transportan pasajeros entre dos nodos (*Sección 2.3*) de origen-destino de demanda (*Sección 2.5*) sin utilizar la red troncal (*Sección 2.4*) y generalmente son líneas que conectan sitios de baja demanda.

Dada la anterior categorización, una estructura jerárquica puede ser fácilmente identificada en una red de transporte de hoy en día (*Ilustración 1*).



Ilustración 1 Fragmento del mapa general del sistema de transporte. Red Metropolitana de Movilidad, Chile

Montevideo y su Sistema de Transporte Metropolitano (STM) no son la excepción, en ese sentido, en el Plan de Movilidad presentado por las autoridades a principios de 2010, se expresa: *“Un sistema de transporte de calidad para la ciudad implica coordinar e integrar sus distintos modos para que se complementen y optimicen. Esto conlleva una necesaria racionalización de la red de transporte público, jerarquización de vías, corredores de transporte y la consecuente revisión de recorridos, tecnologías usadas, características de la flota y políticas territoriales acordes.”* [3].

En el mismo, se detallan objetivos generales como:

- Desarrollar e implementar un modelo de movilidad de personas y mercaderías racional, eficiente y seguro para Montevideo y el territorio metropolitano.
- Optimizar y democratizar los modos de transporte, la accesibilidad y la conectividad de las estructuras y sistemas territoriales contribuyendo al desarrollo urbano y social.
- Potenciar la infraestructura vial de la ciudad y adecuarla a las necesidades de desplazamientos y flujos circulatorios para optimizar las inversiones y minimizar el mantenimiento.

A su vez otros más específicos como:

- Maximizar la calidad y eficiencia del Sistema de Transporte Metropolitano de pasajeros.
- Disminuir los costos de operación de los vehículos del sistema y alcanzar costos de transporte accesibles a la mayoría de la población.
- Contemplar las alternativas de integración intermodal con las infraestructuras y equipamientos necesarios.
- Jerarquizar y caracterizar la estructura de soporte vial del Sistema de Movilidad.

Por estos motivos, es que se plantea un sistema conformado por corredores exclusivos y preferenciales para las líneas troncales, líneas alimentadoras y transversales, paradas, terminales e intercambiadores que *“transporta un alto volumen de pasajeros a lo largo de rutas autorizadas por la Intendencia de manera rápida, segura y confiable”*. [3, p. 15].

Concretamente, el plan propone que el STM adopte *“un modelo tronco-alimentado basado en cinco ejes radiales y uno transversal, que serán resueltos en régimen de carriles exclusivos para líneas troncales de gran capacidad, desde el centro hacia las terminales e intercambiadores de trasbordo ubicados en la periferia.”* [3, p. 16]. Se define que los corredores sean: *Av. Agraciada/Garzón, Av. Gral. Flores, Av. 8 de Octubre, Av. Italia y Av. Rivera, Blvr Batlle y Ordóñez y Blvr Artigas (Ilustración 2)*. Por otro lado, desde terminales e intercambiadores se conectan líneas alimentadoras que recorren los distintos puntos de la ciudad. Complementariamente, otras líneas comunes servirán de costura transversal del sistema, las cuales aseguran la cobertura de toda la ciudad. A su vez, desde las líneas alimentadoras se accede a la red principal (red troncal) en cualquiera de las paradas de las líneas troncales.

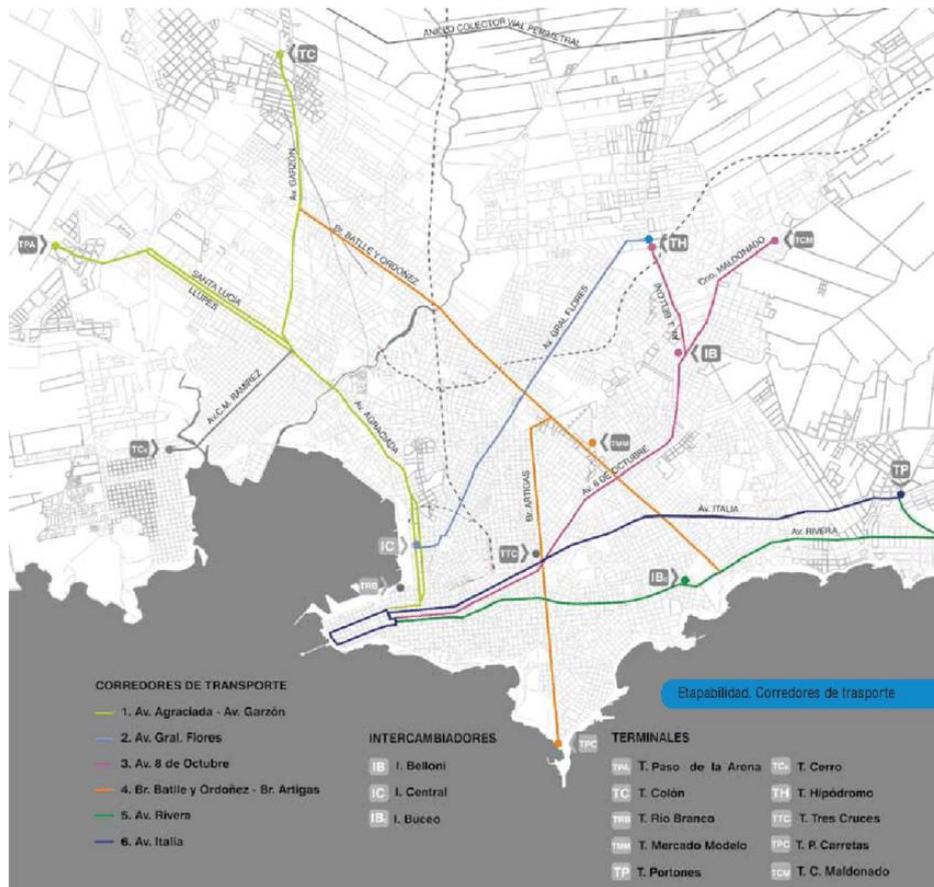


Ilustración 2 Corredores troncales. Plan de movilidad Intendencia de Montevideo

1.1 Motivación y antecedentes

El Plan de Movilidad de la Intendencia de Montevideo propone la creación de seis corredores por los que circulan líneas troncales, además de la creación de terminales e intercambiadores, en un proyecto a largo plazo, con una serie de etapas que requieren de una gran inversión en infraestructura con el objetivo de que el STM pueda ofrecer servicios de alta calidad y accesibles económicamente. Se observa que no está detallado ni especificado el diseño de las líneas alimentadoras, las cuales tienen como objetivo principal acercar pasajeros a las paradas de las líneas troncales, terminales (puntos finales de las líneas troncales) e intercambiadores (puntos intermedios donde se realizan trasbordos entre los distintos modos) y son de vital importancia para un correcto funcionamiento del STM.

Se entiende que, al tener una estructura más flexible, las líneas alimentadoras no requieren de infraestructura adicional más allá de la red de calles existente. Los cambios en el diseño de las líneas alimentadoras tienen menor impacto en el sistema de transporte en cuanto al costo. Esta flexibilidad implica que existe un mayor grado de libertad a la hora de generar la red alimentadora. Además, ante cambios en la red troncal que puedan impactar en el comportamiento de la demanda de todo el sistema, como por ejemplo mejoras en la velocidad operativa de la red, permite reconfigurar la red alimentadora para adaptarla a la nueva realidad [1].

Además, es imprescindible generar recorridos contemplando los intereses de los distintos actores dentro del sistema de transporte. Es decir, recorridos que logren reducir el tiempo de viaje para los **usuarios**, que son *todas aquellas personas que tienen necesidades de transporte y que deben utilizar tiempo y dinero para satisfacerlas*, y por otro lado, reducir el costo operativo de los **operadores** de transporte, que son aquellos que *brindan a los usuarios el servicio de transporte, proveyendo para ello recursos económicos como son los vehículos, el combustible, la mano de obra y el mantenimiento* [4].

El Departamento de Investigación Operativa del Instituto de Computación (InCo) ha realizado estudios de lo que, en la literatura, se conoce como *Transit Network Design Problem* [5], entendido como el problema del diseño óptimo de recorridos y frecuencias para transporte público, bajo una realidad de transporte sin jerarquías. En general, la resolución al TNDP implica hallar un conjunto de recorridos de transporte público urbano colectivo, con frecuencias asociadas, en base a información geográfica y de demanda, bajo una realidad de transporte unimodal [1].

Por otra parte, el *Feeder Bus Network Design Problem -Problema del Diseño de la Red Alimentadora* (FBNDP) es el problema identificado en la literatura internacional, de diseñar un conjunto de recorridos de ómnibus y determinar la frecuencia de servicio en cada recorrido, para minimizar la suma de los costos del operador y del usuario en una red jerárquica [6]. El problema que se plantea resolver en este trabajo difiere en ciertos aspectos de la definición anterior. Las diferencias más importantes se pueden resumir en:

- Considerar la naturaleza interzonal de la demanda. La demanda de viajes de una región se caracteriza mediante la división en zonas de la misma, donde una cierta cantidad de viajes en un cierto período de tiempo se representan a nivel de zona de origen y zona de destino de los mismos.
- Admitir recorridos de segundo nivel no exclusivamente alimentadores.
- Utilizar una representación con un alto nivel de detalle (representación de calles y esquinas) de la red.

Los algoritmos de resolución hallados en la literatura no toman en consideración estas diferencias, razón por la cual se deben buscar soluciones alternativas a los algoritmos de resolución del FBNDP. Es así entonces que se parte por definir un nuevo problema, el Extended Feeder Bus Network Design Problem, que surge de extender el FBNDP para así contemplar las diferencias mencionadas anteriormente.

A diferencia del TNDP, el FBNDP tiene una naturaleza multimodal, pues el problema que resuelve es el diseño de recorridos alimentadores para servir a otra red de mayor jerarquía ya existente. Sin perjuicio de ello, se debe tener en cuenta que ambos problemas comparten características similares, lo cual permite la simplificación del FBNDP bajo ciertas consideraciones y supuestos, de manera tal que se pueda resolver el problema mediante la adaptación de técnicas definidas originalmente para el TNDP.

Dados los motivos descritos anteriormente, surge la idea de expandir el horizonte de investigación considerado en este proyecto, el cual consideraba únicamente el FBNDP, para así considerar algoritmos de resolución del TNDP, que puedan servir como motivación para el desarrollo de un algoritmo que permita lograr los objetivos de este trabajo. En este contexto, es que se llega al *Algoritmo de Inserción de Pares* [7] (PIA, por su sigla en inglés) para la resolución del TNDP, el cual se encuentra especialmente diseñado para producir un conjunto de recorridos que satisfacen la

demanda interzonal tomando en cuenta intereses de usuarios y operadores. A partir del PIA es que en este trabajo se construye un algoritmo (*Extended Pair Insertion Algorithm, EPIA*) que se adapta a la realidad planteada en el EFBNDP, donde la modificación más relevante viene dada por el hecho de que el algoritmo propuesto puede ser utilizado también en una red jerárquica para un sistema bimodal, y en particular, en una red con estructura tronco-alimentadora.

1.2 Objetivos y alcance del trabajo

Este trabajo se enmarca en la línea de investigación del Departamento de Investigación Operativa del InCo, relativa a la aplicación de técnicas de optimización y simulación a problemas de planificación y operación de sistemas de transporte público urbano colectivo.

El presente trabajo plantea el estudio del problema general del diseño de redes de transporte público. En particular, al diseño de recorridos alimentadores para sistemas de transporte público, en base a información de demanda de viajes interzonales, mediante la resolución de modelos de optimización combinatoria.

Se presentan a continuación, los principales objetivos del trabajo:

- Adquirir conocimiento acerca del diseño de servicios alimentadores para sistemas de transporte público. Para ello, se realiza un estudio de literatura especializada, que permita comprender el problema y su importancia, así como también las soluciones del estado del arte existentes en la actualidad.
- Lograr un diseño conceptual e implementación computacional de un método de optimización para el diseño de servicios alimentadores, en base a información de demanda de viajes interzonales, contemplando los intereses de los usuarios y operadores. El modelo deberá ser capaz de responder, por ejemplo, a las siguientes interrogantes: ¿cómo impacta la velocidad de la línea troncal en la definición de las redes alimentadoras?, ¿cuál es el efecto del tiempo de viaje máximo permitido en la cantidad de recorridos generados?
- Aplicar la solución a un caso de estudio real sobre una ciudad de tamaño mediano o grande. Para lograr este objetivo, se trabaja en torno a las definiciones del *Plan de Movilidad*, más específicamente a la implementación de corredores de ómnibus sobre la ciudad de Montevideo. Se deberán tomar como base, instancias disponibles en el grupo de investigación, así como datos tomados de la literatura y disponibles en repositorios de acceso público.

1.3 Resultados y aportes del trabajo

Los resultados y aportes del trabajo pueden ser separados en dos temáticas:

1. Definición del modelo y diseño del algoritmo de resolución:
 - Se introduce el *EFBNDP*, que surge como una extensión del *FBNDP* para incluir el concepto de demanda interzonal y la admisión de recorridos de segundo nivel.
 - Se propone un modelo de optimización combinatoria sobre redes para el *EFBNDP*, cuya formulación está fuertemente basada en modelos existentes para el problema de generación de recorridos alimentadores bajo una realidad de transporte multimodal.
 - Se propone el algoritmo *EPIA*, cómo una adaptación del *PIA* [4] para admitir su aplicación bajo una realidad de transporte multimodal. La implementación de este algoritmo resulta en una herramienta funcional para un análisis inicial sobre los beneficios de una red troncal dada, mediante la resolución del *EFBNDP*.
2. Caso de estudio, que conlleva la adquisición y procesamiento de datos requeridos para la implementación y ejecución del modelo computacional:
 - Información de la red vial. Se generó a partir de información disponible públicamente en el Catálogo de Datos Abiertos [8]. La información obtenida cuenta únicamente con la definición de calles (ejes) y no de esquinas (sus intersecciones), por lo que no es apta para generar el grafo que representa la red
 - Información de la demanda interzonal. Se generó la matriz origen-destino que caracteriza la demanda interzonal, a partir de la división zonal de análisis de tráfico y estimaciones en base al conteo del uso de la tarjeta STM (tarjeta inteligente para abonar viajes del Sistema de Transporte Metropolitano de Montevideo) a nivel de paradas [9]. La zonificación original abarca la región metropolitana en su totalidad, por lo que fue necesario reducirla a efectos de simplificación, quitando así las zonas que no corresponden a Montevideo y también aquellas zonas de gran tamaño y baja concentración de demanda pertenecientes a la periferia.

Mediante la ejecución del algoritmo para el caso de estudio de la ciudad de Montevideo, bajo diferentes escenarios, se obtuvieron resultados que permiten:

- Evaluar los costos del sistema para los usuarios y los operadores, así como también distintas medidas respecto al uso de la red y los beneficios de la red troncal, bajo el supuesto de la implementación de los corredores de ómnibus (troncales) definidos según el Plan de Movilidad de la Intendencia de Montevideo.

- Obtener soluciones, generadas por el algoritmo propuesto, las cuales consisten en diferentes propuestas de trazados de recorridos alimentadores para satisfacer la demanda interzonal. Las soluciones provienen de utilizar diferentes valores para algunos factores del modelo, que representan tanto las características operacionales de los diferentes modos, como diferentes decisiones de diseño acerca de la red. La comparación entre los resultados permite ver el grado de incidencia de cada factor en la generación y trazado de recorridos alimentadores. Es posible visualizar el trazado de los recorridos, utilizando una aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) que soporte la visualización de datos geoespaciales [10].

1.4 Estructura del informe

En el *Capítulo 2, Presentación del Problema*, se presenta el *EFBNDP*; se definen los objetivos y restricciones; se propone un modelo de optimización combinatoria sobre redes para el *EFBNDP* y se establecen las hipótesis de trabajo, principalmente respecto al modelado de la red vial, la red troncal y de la demanda. En el *Capítulo 3, Presentación del Algoritmo de Resolución*, se presenta el algoritmo *PIA* utilizado como referencia y a su vez se propone el algoritmo *EPIA* para la resolución aproximada del modelo de optimización propuesto, además de detalles de la implementación del mismo y mejoras al código implementado. En el *Capítulo 4, Validación del Algoritmo*, se presentan un conjunto de casos de prueba para un subconjunto reducido de la red de calles de la ciudad de Montevideo de manera tal de validar la implementación del algoritmo. En el *Capítulo 5, Caso de Estudio*, se presentan detalles relacionados con la construcción del caso de estudio: zonificación definida, construcción de la matriz origen-destino, construcción de la red. Se detalla el componente de análisis de resultados y se presentan las distintas métricas utilizadas para evaluar los resultados. Se muestran los resultados (numéricos y representación gráfica) para los casos de prueba detallados en el plan de pruebas y análisis de los mismos. En el *Capítulo 6* se presenta un resumen del trabajo, fuentes de dificultad identificadas a lo largo del mismo, conclusiones y posibles mejoras para un trabajo a futuro. En el *Anexo I, Generación de matriz origen-destino*, se muestra los detalles de la transformación de datos para lograr la matriz de demanda interzonal. En el *Anexo II, Construcción de la red*, se profundiza en detalles de la construcción de la red.

Presentación del problema

2.1 Feeder Bus Network Design Problem

El FBNDP se puede ver como el problema de obtener un balance adecuado entre costos de operación y costos de usuario en una red jerárquica de transporte público [6]. El problema se representa con una red que incluye dos tipos de nodos, troncales y de ómnibus, los cuales representan paradas de la red troncal y paradas de ómnibus respectivamente. Del mismo modo, las aristas troncales representan segmentos de línea troncal, mientras que las aristas de ómnibus representan segmentos de recorrido alimentador de ómnibus. Las ubicaciones de las paradas de ómnibus se encuentran especificadas previamente. La demanda se asume concentrada en los nodos de ómnibus y no se representa la distribución temporal de la misma, la cual además se asume es inelástica, es decir, que la matriz origen-destino que caracteriza la demanda permanece invariable respecto al nivel de servicio que provee la red.

Desde el punto de vista del modelado matemático es un problema complejo, el cual se formula generalmente como un problema de optimización no lineal con variables y restricciones discretas y continuas [11]. Los métodos más eficientes de resolución se basan en procedimientos heurísticos, pero sus aplicaciones se limitan principalmente a casos de prueba, redes reales de pequeño tamaño o utilizando abstracciones para la representación de la red.

2.2 Extended Feeder Bus Network Design Problem (EFBNDP)

En el estado del arte se puede encontrar un gran número de investigaciones [6] [11] [12] [13] sobre el diseño de redes alimentadoras bajo la definición del FBNDP. Sin embargo, no se cuenta con investigaciones que contemplen la realidad interzonal de la demanda o que admitan la generación de recorridos no exclusivamente alimentadores como parte de la solución.

Se entiende que estos conceptos son aspectos claves en la generación de recorridos alimentadores, los cuales no son considerados como parte de la definición original del problema. Es por este motivo que se considera necesario introducir el *Extended Feeder Bus Network Design Problem* (EFBNDP), que nace como una extensión del FBNDP, con el objetivo de:

- Considerar la naturaleza interzonal de la demanda, a diferencia de la definición original, en la cual se considera que el destino (u origen) de cada viaje es una parada de la troncal. La naturaleza interzonal se aborda en este trabajo tomando la definición de demanda a partir de una matriz origen-destino definida por zonas.
- Extender el concepto de recorridos alimentadores, con el fin de admitir recorridos de segundo nivel no exclusivamente alimentadores en las soluciones propuestas. Es decir, recorridos que satisfagan demanda sin conectarse a la red troncal.

2.3 Red

En este trabajo se modela la red sobre la que se generan los recorridos mediante un grafo $G = (N, A)$, donde N es un conjunto de nodos y A es un conjunto de aristas no dirigidas, que conectan nodos. En particular, un elemento del conjunto N , puede representar una intersección de calles (esquina), o bien, un centroide de zona, que es un punto imaginario en el cual se concentra la demanda de una zona y que generalmente se encuentra en el baricentro de esta.

Por otra parte, un elemento del conjunto A , representa la conexión entre dos nodos. Esta conexión se puede corresponder con una calle de la red vial o con un *walking path*. Un *walking path* es la representación ficticia de una cierta distancia recorrida a pie entre un centroide y otro nodo de la red. A su vez, las aristas tienen un costo asociado cuyo valor es su longitud (distancia entre sus nodos extremos) medida en kilómetros y cero para el caso de los *walking paths*, ya que en el modelo considerado en este trabajo no se considera el tiempo de caminata como parte del costo de usuarios ni operadores.

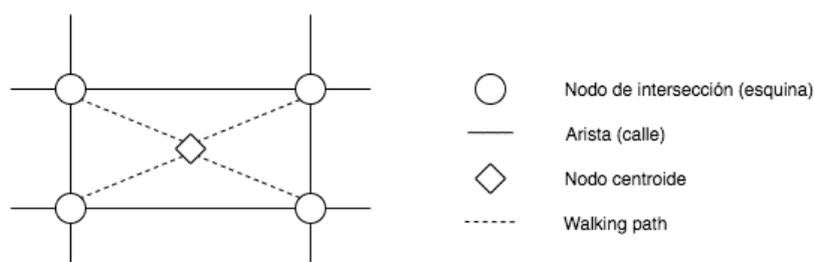


Ilustración 3 Representación de la red

2.4 Red troncal

La red troncal es un subconjunto de la red G , cuyo principal propósito es atender la alta demanda de viajes interzonales, transportando un gran volumen de pasajeros, con un mayor desempeño en términos de tiempo de viaje con respecto a los medios de transporte que operan los recorridos de segundo nivel.

Concretamente en este trabajo se modelan las principales características de la red troncal con *nodos paradas* y *aristas troncales*:

- *nodos parada*: son nodos pertenecientes al conjunto N , los cuales sirven especialmente como conexión a la red troncal. Generalmente se encuentran espaciados a lo largo de la troncal de forma tal que permitan mayor fluidez, evitando así grandes demoras por ascensos y descensos de pasajeros.
- *aristas troncales*: son aristas pertenecientes al conjunto A , que representan las vías sobre las cuales se encuentra definida la red troncal. El costo asociado a estas aristas es calculado como la longitud (en kilómetros) multiplicada por un coeficiente de velocidad relativa de la red troncal con respecto a la red de segundo nivel, por lo que la unidad del costo de una arista es kilómetros sobre velocidad relativa ($\text{km}/\text{vel}_{\text{rel}}$). A modo de ejemplo, si la velocidad promedio del medio de transporte de los recorridos alimentadores fuese de 24 km/h (ómnibus), la velocidad promedio del medio de transporte que transita sobre la red troncal fuese de 40 km/h (BRT) y la distancia de la arista fuese de 1 km, entonces el costo de la arista troncal sería de $1 \cdot (24/40) \text{ km}/\text{vel}_{\text{rel}}$.

2.5 Demanda

La demanda de viajes de una región se caracteriza mediante la división en zonas de la misma. Tomando como base la división zonal, la demanda se define a través de una matriz origen-destino $D = \{ d_{ij} \}$, donde tanto i como j denotan zonas que son representadas mediante nodos de G . Cada entrada de la matriz representa la demanda de viajes desde la zona i hacia la zona j , expresada en viajes (de una persona que ocupará un lugar en un vehículo) por unidad de tiempo, en un determinado período de estudio.

Según el nivel de detalle del modelo, existen distintas formas de relacionar los elementos de la red con los elementos de la matriz origen-destino. En el modelo utilizado en este trabajo, al hacer uso de centroides y un modelo detallado de la red, los valores de demanda se corresponden directamente con nodos centroides de zonas. A lo largo de este trabajo se utiliza el término "par origen-destino" para referirse a la dupla de centroides de zona para los cuales la demanda entre dichas zonas está representada por una entrada d_{ij} de la matriz origen-destino D .

2.6 Hipótesis de trabajo

En la presente sección se detallan las hipótesis y supuestos considerados a lo largo de este trabajo:

1. El modelo propuesto no considera la capacidad de los ómnibus, por ende, no incluye el tamaño de flota en el modelo y no prevé incluir la frecuencia de los recorridos en la solución. El principal motivo de esta hipótesis es que el estudio de la frecuencia introduce una alta complejidad y excede el alcance del proyecto. Por otro lado, es razonable pensar que la capacidad se puede determinar en una etapa posterior, luego de que estén fijadas las líneas.
2. La demanda interzonal se considera dada e inelástica.
3. Se asume que la red troncal es conexa y está definida con sus correspondientes paradas, por lo que no se consideran costos de infraestructura (ni construcción ni operación) en el costo de los operadores.
4. La velocidad de los vehículos es dada y permanece constante para todos los recorridos dentro de cada modo, es decir, tanto para las líneas alimentadoras como para las líneas troncales.
5. Son parámetros requeridos por el modelo: velocidad relativa de la red troncal y matriz origen-destino.
6. Para el cálculo del costo de usuarios, no se toma en cuenta el tiempo de caminata por walking paths, el tiempo de espera en parada ni el tiempo de transbordo (intercambio entre líneas).
7. Cada zona, tiene una y solo una parada asociada próxima al centroide que concentra la demanda de la misma.

8. No se considera el sentido de la red de calles y los recorridos generados son bidireccionales. Esta es una simplificación que permite una representación abstracta de la realidad a través de un grafo no dirigido de menor complejidad.
9. Dado que no consideran capacidades de los ómnibus (ver punto 1), para todo par origen-destino para el cual existe un recorrido generado que lo incluye, se considera que toda la demanda generada para ese par origen-destino está satisfecha.

Las hipótesis numeradas del 2 al 6 son restricciones y supuestos que generalmente se encuentran a lo largo de la literatura consultada, sirviendo de marco base para la mayoría de los modelos propuestos como solución del FBNDP [6] [12]. Por otra parte, las hipótesis 7 a 9 son introducidas principalmente para simplificar el modelo propuesto y cubrir los objetivos y alcance del proyecto.

2.7 Función objetivo

En el contexto de un modelo de optimización que resuelve el problema planteado en la *Sección 2.2*, resulta conveniente presentar y discutir los intereses de los principales actores del sistema de transporte (usuarios y operadores). Con respecto a los intereses de los usuarios del sistema de transporte, son muchos los aspectos a tener en cuenta a la hora de cuantificar el nivel de satisfacción de los pasajeros, como por ejemplo:

- tiempo de viaje a bordo de los vehículos
- tiempo de espera en las paradas
- costo de acceso al sistema (acceso a terminales), en general refiere a la distancia
- mayor conectividad posible entre las distintas zonas de la ciudad
- confort y seguridad

En resumen, podría decirse que los pasajeros buscan moverse desde su origen hasta su destino de la forma más rápida, confortable, segura y menos costosa posible [1]. Generalmente en los modelos para el FBNDP, el tiempo de viaje es el objetivo primario a optimizar y las variables de tarifas, confort y seguridad no son tenidas en cuenta. A lo largo de este trabajo la única componente del tiempo de viaje que es considerada es el tiempo de viaje a bordo, y a menos que se indique lo contrario, las componentes de tiempo de espera en parada, los tiempos de transbordo y de caminata son ignorados. Por lo tanto, desde el punto de vista de los usuarios, la solución óptima viene dada por generar recorridos entre origen y destino para los cuales existe demanda, buscando que los tiempos de viaje sean lo más cortos posibles y con la máxima frecuencia posible. Cabe destacar, que la optimización de frecuencias de recorridos no es un objetivo en el presente trabajo.

Por otro lado, los operadores buscan el máximo beneficio posible en sus operaciones. Es decir, con el menor costo operacional, satisfacer una demanda de viajes dada, de manera tal de maximizar sus ganancias [1]. Entonces, para los operadores la solución óptima se obtiene al conectar todos los puntos de demanda a una frecuencia mínima. Dadas las hipótesis del problema y las restricciones especificadas en la *Sección 2.6*, para este trabajo se tendrá en cuenta solamente el largo de los recorridos alimentadores y de segundo nivel para cuantificar el costo operacional de los recorridos alimentadores, ignorando así la frecuencia de los mismos y la flota requerida.

A lo largo de la literatura especializada [12] [13], la formulación general de la función objetivo es relativamente estándar, más allá de que los distintos modelos incluyen distintas componentes, tanto para la definición de costos de usuarios como de operadores para modelar un problema en particular.

Entonces, la función objetivo se puede ver como la minimización de una combinación lineal de las funciones de costos de usuarios (C_U) y operadores (C_O):

$$\begin{aligned} \min \quad & C_U(S) + C_O(S) \\ \text{s. a.} \quad & S \in \mathcal{C} \end{aligned}$$

donde S es el conjunto solución formado por varios recorridos (donde cada recorrido es una secuencia de nodos o aristas, dependiendo de la implementación), generado por el algoritmo que se utilice para resolver el modelo, perteneciente la región factible \mathcal{C} que es el conjunto de todos los conjuntos de recorridos posibles.

2.8 Modelo propuesto para el EFBNDP

En esta sección se presenta el modelo de optimización propuesto para el EFBNDP. La siguiente formulación matemática está basada en formulaciones existentes dentro de la literatura consultada [6] [12] [13]. Esta formulación cuenta con menos restricciones que las formulaciones habituales debido a las hipótesis de trabajo previamente estipuladas; además la misma no busca ser una formulación de programación matemática explícita, ya que el problema es difícil de formular y no hay muchos trabajos al respecto [14] [15] y las formulaciones resultantes no permiten la resolución de casos medianos y grandes. Por lo tanto, la siguiente formulación es parcialmente implícita y su objetivo es servir como marco de referencia para el algoritmo heurístico de resolución.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{k \in K} d_k * SP_k(S \cup T) + \sum_{s \in S} \sum_{a \in s} c_a * x_a \\ \text{s. a.} \quad & \\ & \sum_{a \in s} c_a \leq CM \quad \forall s \in S \\ & SP_{s_1, s_2}(G) \geq RC \quad \forall s \in S \end{aligned}$$

Donde:

- $K \in [1..n]$ es el conjunto de pares origen-destino.
- $S \in [1..m]$ es el conjunto de recorridos de la solución.
- $T \subseteq G$ es el subgrafo de la red que se corresponde con la red troncal.
- $d_k \in \mathbb{N}$ es la demanda del par origen-destino $k \in K$. $d_k > 0 \quad \forall k \in K$.
- $c_a \in \mathbb{R}$ es el costo de la arista $a \in A$ (conjunto de aristas de la red). $c_a \geq 0 \quad \forall a \in A$.
- $s \in S$ es un conjunto de aristas que componen un recorrido de la solución S .
- $s_1(s_2)$ representa el extremo 1 (extremo 2), $\forall s \in S$.

- $CM \in \mathbb{R}$ es la cota superior para el costo de todo recorrido $s \in S$.
- $RC \in \mathbb{R}$ es la cota inferior para el costo del camino más corto entre s_o y $s_d \forall s \in S$.
- $SP_k(P) \in \mathbb{R}$ es el costo del camino más corto en el grafo $P \subseteq G$ del par origen-destino $k \in K$.
- $x_a \begin{cases} 0 & \text{si } a \in T \\ 1 & \text{en caso contrario} \end{cases} \forall a \in A$

En la formulación matemática definida, la variable de decisión del modelo de optimización es S , un conjunto de recorridos, donde cada recorrido $s \in S$ es una secuencia de aristas de la red G (sin distinguir entre si la arista pertenece a la troncal o no).

El componente SP_k representa el comportamiento de los usuarios respecto al uso de la red. Se asume que los usuarios se mueven por el camino más corto del grafo que se encuentra definido por la unión de la red fija T (troncal) y S , que es la decisión que toma el modelo.

CM (*Costo Máximo permitido por recorrido*) es la cota superior para el costo de todo recorrido $s \in S$. La restricción tiene un triple cometido, por un lado, representa los intereses de los usuarios; y a su vez sirve como balance de la calidad de la solución entre usuarios y operadores. Notar que los intereses de usuarios y operadores son contrapuestos, y que variando este parámetro es posible obtener soluciones con diferentes compromisos entre dichos intereses [4] [7]. En general, aumentar el valor de CM , resulta en recorridos con mayor tiempo de viaje, que se traduce en recorridos más extensos, que en términos generales son convenientes para los operadores, pero no así para los usuarios. Por otro lado, un valor menor provoca que se generen recorridos de menor extensión, es decir más directos, beneficiando más a los usuarios que operadores. El tercer cometido de la restricción es evitar que se generen recorridos cuya extensión podría no ser aplicable a la realidad, permitiendo establecer un costo razonable según el caso (ciudad) con el que se desee trabajar.

RC (*Restricción Cíclica*, también denominada como "Factor Cíclico" [4]) es la cota inferior para el costo del camino más corto entre origen y destino de todo recorrido $s \in S$ y su objetivo es regular la calidad de la solución (recorridos), evitando la generación de recorridos cíclicos, es decir, que origen y destino de un mismo recorrido $s \in S$ estén lo suficientemente alejados entre sí. RC conceptualmente indica la separación mínima que debe existir entre los extremos para todo recorrido generado. Este parámetro, al igual que CM , contribuye en la regulación del compromiso de la solución entre intereses de usuarios y operadores.

Finalmente, con este modelo se hace posible abordar uno de los principales objetivos del estudio, que es estudiar el efecto de algunos parámetros relevantes operacionales y de diseño de la red sobre la red alimentadora. De este modo, el modelo permite:

- variar la velocidad de la red troncal (costos de aristas de T) y observar su efecto en el resultado S .
- variar los parámetros de diseño (decisiones del planificador) CM y RC , y observar su efecto en el resultado S .

Presentación del algoritmo de resolución

En este capítulo, en primera instancia, se presenta el algoritmo sobre el cual se encuentra basada la solución al EFBNDP propuesta en este trabajo, para luego analizar en detalle el algoritmo propuesto y detalles relevantes de su implementación.

No existen algoritmos para la resolución del EFBNDP en forma exacta debido a los siguientes motivos:

- Es una variante de un problema de ruteo, de gran tamaño y complejidad. Los modelos para diseño de redes de transporte público formulados mediante Programación Lineal Entera han sido resueltos de manera óptima únicamente para redes de tamaño pequeño [14].
- Resulta complejo expresar las restricciones y la función objetivo en términos de las variables de decisión, en una notación de programación matemática estándar [5].

Debido a estas complejidades es que los algoritmos de resolución hallados en la literatura son todos aproximados, incluyendo algoritmos heurísticos y metaheurísticos (por ejemplo, Algoritmos Genéticos) [11]. A pesar de esto, sin importar los métodos utilizados, podemos distinguir una estructura similar, claramente definida, común a todos los algoritmos. Las componentes algorítmicas de dicha estructura operan con las soluciones del problema para lograr un fin específico. Dicho esto, las componentes que se pueden identificar son: construcción, evaluación y mejora de soluciones [4].

Construcción: Es el componente encargado de la generación de un conjunto de recorridos válido, que contemple la red, la demanda y las restricciones impuestas al modelo de optimización. Los criterios de construcción son variados, siendo los más comunes el de camino más corto entre pares de nodos de alta demanda, y aleatorio en el caso de algoritmos aleatorios.

Evaluación: Realiza el cálculo de la función objetivo para una solución dada. Es un componente crítico que debe reflejar la realidad de manera adecuada, pero a un costo computacional razonable, debido a que su aplicación será intensa en el contexto del algoritmo de optimización.

Mejora de Soluciones: Partiendo de una solución concreta, aplica un procedimiento de modificaciones sistemáticas para mejorar la calidad de la solución. Una solución creada por el componente de construcción no es necesariamente un óptimo global, pero tampoco es necesariamente un óptimo local, por lo tanto, es altamente probable que la solución sea mejorable. Las modificaciones se pueden realizar a través de búsqueda local o mejora iterativa, entre otros métodos.

Debido a la complejidad algorítmica, el tiempo de desarrollo e información requerida para la implementación de un algoritmo de optimización basado en heurísticas o en metaheurísticas, que incluye los tres componentes mencionados más arriba, es que el alcance de este trabajo se limita al desarrollo de algoritmos para los componentes de *Construcción* y *Evaluación*. Estos componentes podrán ser utilizados en un futuro, mediante la incorporación de un componente de Mejora.

3.1 Pair Insertion Algorithm

Se presenta el algoritmo que fue utilizado como punto de partida para el desarrollo de la solución para el EFBNDP. El grado de detalle con que se describe el algoritmo pretende mostrar a grandes rasgos los conceptos utilizados para construir la solución alcanzada en este trabajo, con foco en el componente de construcción.

El algoritmo que es uno de los componentes que se utiliza en la solución, resuelve en forma aproximada el modelo propuesto para el TNDP [7]. La solución está diseñada en base a tres componentes principales, los cuales se acoplan a la estructura presentada anteriormente.

- *Construcción de soluciones.* Genera un conjunto R de recorridos en base a la información de la red G y de la matriz origen-destino D , que verifican un subconjunto de las restricciones del modelo de optimización.
- *Evaluación de soluciones.* Aplica un modelo de asignación de pasajeros a recorridos, para calcular los valores de las funciones objetivo. Adicionalmente calcula las frecuencias mínimas factibles según las restricciones del modelo de optimización.
- *Mejora de soluciones.* Aplica un procedimiento de búsqueda local multiobjetivo sobre el conjunto de frecuencias F , tomadas de un conjunto discreto de valores.

Estas componentes se articulan en el marco general de la metodología GRASP, adaptada para el caso de un modelo de optimización multiobjetivo.

Se presenta únicamente el componente de *Construcción de soluciones*, denominado PIA (Pair Insertion Algorithm), ya que, de los tres, es el único que tiene relación e influencia directa sobre este trabajo. Dicho componente es un algoritmo ávido (o *greedy*), una clase de algoritmos que construyen una solución en forma incremental tomando decisiones localmente óptimas. El componente se basa en la generación de recorridos entre pares de nodos con alto valor de demanda (*Ilustración 4*). La construcción de estos recorridos se realiza en base a la generación de caminos más cortos entre los nodos.

Para esto, al momento de considerar cada par de nodos de alta demanda, se evalúa tanto la generación de un nuevo recorrido por camino más corto, como también la posibilidad de ser insertado en un recorrido existente (*Ilustración 5*). Se busca insertar pares en recorridos existentes, para no agregar nuevos recorridos y así evitar aumentar el costo de operadores. En caso de insertar muchos pares en un recorrido, el mismo comienza a desviarse y a crecer en longitud, lo que no es bueno para los usuarios.

```

procedure Construccion(in  $G$ , in  $D$ , in  $D_0^{min}$ , in  $D_{01}^{min}$ , in  $\rho_{max}$ , in  $t_{max}$ , in  $\alpha$ ,
in semilla, out  $R$ );
01 Inicializar el generador de números pseudoaleatorios con semilla;
02  $R \leftarrow \emptyset$ ;
03  $D_0 \leftarrow 0$ ;
04  $D_{01} \leftarrow 0$ ;
05  $l \leftarrow$  Lista de todos los pares de nodos  $(i, j)$  de  $G$ , ordenada en forma decreciente
    por valor de demanda  $d_{ij}$ ;
06 while  $D_0 < D_0^{min}$  or  $D_{01} < D_{01}^{min}$  do
07    $(i, j) \leftarrow$  Seleccionar aleatoriamente un elemento entre los primeros de  $l$  (según  $\alpha$ )
    y eliminarlo de  $l$ ;
08    $r \leftarrow$  Construir un recorrido con el camino más corto (tiempo de viaje en vehículo)
    de  $i$  a  $j$  en  $G$ ;
09    $r' \leftarrow$  Construir un recorrido insertando los nodos  $i$  y  $j$  en las posiciones más
    convenientes en el recorrido  $r''$  más conveniente de  $R$ ;
10   if  $costo(r') - costo(r'') < costo(r)$  then
11      $R \leftarrow R \cup \{r'\} - \{r''\}$ ;
12     Eliminar de  $l$  los pares de nodos cuya demanda es satisfecha por  $r'$ ;
13   else
14      $R \leftarrow R \cup \{r\}$ ;
15     Eliminar de  $l$  los pares de nodos cuya demanda es satisfecha por  $r$ ;
16   end if;
17    $D_0 \leftarrow$  Actualizar proporción de demanda satisfecha por  $R$  con viajes directos;
18    $D_{01} \leftarrow$  Actualizar proporción de demanda satisfecha por  $R$  con viajes directos
    o con al menos un transbordo;
19 end while;
20 Combinar recorridos cortos de  $R$ ;
21 return  $R$ ;
end Construccion;

```

Ilustración 4 Componente de construcción, tomado de [6]

```

procedure Insercion(in  $(i, j)$ , in  $R$ , out  $(posI, posJ)$ , out  $rCandidato$ );
01  $posI \leftarrow 0$ ;  $posJ \leftarrow 0$ ;  $rCandidato \leftarrow \emptyset$ ;
02 for each  $r \in R$  do
03   if  $i \in r$ 
04     for each  $pos \in r$  do
05        $r' \leftarrow$  Construir recorrido a partir de  $r$ , insertando  $j$  en la posición  $pos$ ;
06       if  $costo(r') < costo(rCandidato)$ 
07          $rCandidato \leftarrow r'$ ;  $posJ \leftarrow pos$ ;
08       end if;
09     end for;
10   else if  $j \in r$ 
11     for each  $pos \in r$  do
12        $r' \leftarrow$  Construir recorrido a partir de  $r$ , insertando  $i$  en la posición  $pos$ ;
13       if  $costo(r') < costo(rCandidato)$ 
14          $rCandidato \leftarrow r'$ ;  $posI \leftarrow pos$ ;
15       end if;
16     end for;
17   else
18     for each  $pos_1, pos_2 \in r$  do
19        $r' \leftarrow$  Construir recorrido a partir de  $r$ , insertando  $i$  en la posición  $pos_1$ 
    y  $j$  en la posición  $pos_2$ ;
20       if  $costo(r') < costo(rCandidato)$ 
21          $rCandidato \leftarrow r'$ ;  $posI \leftarrow pos_1$ ;  $posJ \leftarrow pos_2$ ;
22       end if;
23     end for;
24   end if;
25 end for;
26 return  $(posI, posJ)$ ,  $rCandidato$ ;
end Insercion;

```

Ilustración 5 Inserción de pares, tomado de [6]

3.2 Extended Pair Insertion Algorithm (EPIA)

En la *Ilustración 6*, se presenta el algoritmo de construcción propuesto y desarrollado en este trabajo, denominado EPIA (Extended Pair Insertion Algorithm), el cual permite construir un conjunto de recorridos alimentadores solución del EFBNDP. La principal diferencia con el algoritmo PIA viene dada por el hecho de considerar una red troncal T a la cual los recorridos alimentadores, a generar como parte de la solución, pueden conectarse con el fin de satisfacer una demanda dada. Considerando la red troncal, y con ella, su velocidad relativa con respecto a la red alimentadora y restricciones de conexión, el algoritmo de construcción queda definido como se presenta en la *Ilustración 6*.

```

procedure Construcción (in  $G$ , in  $T$ , in  $vel_{troncal}$ , in  $OD$ , in  $CM$ , in
 $RC$ , out  $R$ , out  $R_A$ , out  $DNC$ )
1: Procesar  $G$  para definir costos de aristas troncales basados en  $T$  y
 $vel_{troncal}$ .
2:  $R \leftarrow \emptyset$ 
3:  $DNC \leftarrow \emptyset$ 
4: Remover de  $OD$  los pares contenidos exclusivamente en la red troncal.
5: while  $OD$  no vacía do
6:    $(o, d) \leftarrow head(OD)$ 
7:    $r \leftarrow$  Construir recorrido con el camino mas corto desde  $o$  hasta  $d$  en
 $G$  y validación de  $RC$ 
8:    $r' \leftarrow$  Construir recorrido candidato insertando  $o$  y  $d$  en las posiciones
más convenientes para algún  $r'' \in R$  usando el componente de Inserción
9:   if  $costo(r') - costo(r'') < costo(r)$  then
10:      $R \leftarrow R \cup \{r'\} - \{r''\}$ 
11:     Eliminar de  $OD$  los pares cuya demanda se satisface con  $r'$ 
12:   else if  $costo(r) < CM$  then
13:      $R \leftarrow R \cup \{r\}$ 
14:     Eliminar de  $OD$  los pares cuya demanda se satisface con  $r$ 
15:   else
16:      $DNC \leftarrow DNC \cup \{(o, d)\}$ 
17:   end if
18: end while
19:  $R_A \leftarrow$  Construir el conjunto de recorridos alimentadores a partir de  $R$ 
20: return  $R, R_A, DNC$ 
end Construcción

```

Ilustración 6 Componente de construcción, Extended Pair Insertion Algorithm

El algoritmo recibe como parámetros: la red G , la red troncal T (subgrafo conexo de G) y la velocidad relativa $vel_{troncal}$ de la misma con respecto a G (notar que G tiene las características de una red alimentadora, en el sentido de la velocidad en que se mueven los vehículos), la lista de pares origen-destino OD que representan demanda de viajes interzonales, la restricción de costo máximo permitido por recorrido CM y la restricción cíclica RC . A su vez, tiene como salida el conjunto de recorridos R , el conjunto de recorridos alimentadores R_A y DNC , que representa el conjunto de pares origen-destino para los cuales la demanda no puede ser cubierta (en caso de que existan). Notar que puede existir demanda no cubierta, en caso de que no sea posible satisfacer las condiciones del modelo, ya sea la restricción de costo máximo permitido por recorrido y/o la restricción cíclica. Esto depende de la disposición espacial (distancia) de los pares origen-destino, los recorridos ya generados al momento de procesar ese par de demanda, y de los parámetros CM y RC .

Además, es relevante aclarar los siguientes pasos del algoritmo:

- Línea 1: Es necesario un preprocesamiento de G , para calcular el costo de las aristas que hacen parte tanto de G como de T , debido a que el costo en este caso es calculado en función de la velocidad relativa de la troncal $vel_{troncal}$.
- Línea 6: El algoritmo es determinista y siempre toma el primer elemento de la lista de pares origen-destino OD , a diferencia de la definición del PIA original donde se maneja un parámetro (alfa) que se utiliza para seleccionar el elemento de manera aleatoria.
- Línea 7: Se construye el recorrido más corto r desde un origen o hasta un destino d (por ejemplo, utilizando el algoritmo de Dijkstra), y a su vez se hace una validación de restricción cíclica RC (que representa la distancia mínima entre un origen y destino dados).
- Línea 8: Se construye un recorrido candidato r' para el par origen-destino. Esto se hace insertando en las posiciones más convenientes permitidas (contemplando restricciones de conexión a los tramos de red troncal) los nodos o y d en el recorrido más conveniente del conjunto soluciones R . Todo esto a través del método de *Inserción de Pares* presentado en la *Ilustración 8*
- Línea 9: Se evalúa si la diferencia entre el costo del recorrido candidato y el costo del recorrido a modificar es menor que el costo del camino más corto. Básicamente aquí es donde se define si se modifica y se inserta el par od a un recorrido existente o se crea un recorrido nuevo para el par.
- Línea 19: El objetivo de esta línea es generar un conjunto de recorridos alimentadores en base a trayectorias convenientes para los usuarios, por lo tanto, se procesa el conjunto de recorridos R para así obtener el conjunto de recorridos alimentadores R_A . Teniendo en cuenta que los recorridos de R pueden tener tramos pertenecientes a la red troncal, en el procesamiento de R , concretamente lo que se hace es extraer los tramos de red troncal de cada recorrido $r \in R$ si corresponde, creando así recorridos exclusivamente alimentadores (*Ilustración 7*). Cabe resaltar que el conjunto de recorridos alimentadores R_A puede tener igual o mayor cantidad de elementos que el conjunto R . Esto se debe a que algunos de los recorridos de R (aquellos que son multimodales) pueden ser disgregados en múltiples recorridos alimentadores.

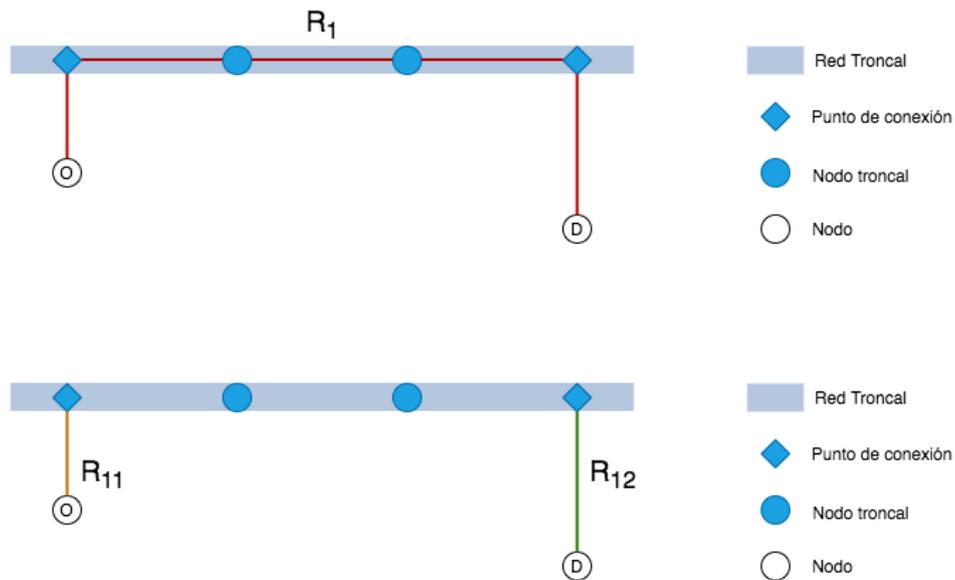


Ilustración 7 Posprocesamiento de recorridos

El *Componente de Construcción* está altamente relacionado con el método de *Inserción de Pares* (Ilustración 8), que es mediante el cual se construyen recorridos candidatos insertando nodos para luego ser evaluados y eventualmente incluidos en la solución.

El método de *Inserción de Pares* (Ilustración 8) evalúa las posiciones más convenientes para insertar los nodos o y d en un recorrido existente del conjunto R . Debido a que para cada par se debe verificar la inserción en toda posición del recorrido (orden cuadrático en la cantidad de nodos del recorrido), es aquí donde se insume el mayor esfuerzo computacional del algoritmo. En este caso, la diferencia más considerable con respecto al PIA original, es que se verifican las restricciones de conexión a los tramos de recorridos que forman parte de la red troncal. Las restricciones de conexión limitan el acceso a la red troncal, por lo que no es posible insertar los nodos en cualquier posición de un recorrido, sino que, solamente es posible hacerlo en los tramos que no forman parte de la troncal, o en los puntos de conexión a la red troncal (es decir, aquellos nodos que son parada en la red troncal). Esto último es consistente con la idea de viaje multimodal, donde un usuario puede intercambiar de modo en una parada de la red troncal, es decir, viajar en un recorrido alimentador durante un tramo de su viaje, y luego cambiar en una parada troncal, para luego continuar su viaje por la red troncal, y viceversa.

```

procedure Inserción (in o, in d, in G, in T, in R, in CM, in RC, out
   $r_{candidato}$ )
1:  $r_{candidato} \leftarrow \emptyset$ 
2: for each  $r \in R$  do
3:   if  $o$  in  $r$  then
4:     for each  $pos \in r$  do
5:       if  $r_{pos} \notin T$  or  $esParadaTroncal(r_{pos})$  then
6:          $r' \leftarrow$  construir nuevo recorrido insertando  $d$  en la posición
            $pos$ 
7:         if  $costo(r') < costo(r_{candidato})$  then
8:            $r_{candidato} \leftarrow r'$ 
9:         end if
10:      end if
11:    end for
12:  else if  $d$  in  $r$  then
13:    for each  $pos \in r$  do
14:      if  $r_{pos} \notin T$  or  $esParadaTroncal(r_{pos})$  then
15:         $r' \leftarrow$  construir nuevo recorrido insertando  $o$  en la posición
            $pos$ 
16:        if  $costo(r') < costo(r_{candidato})$  then
17:           $r_{candidato} \leftarrow r'$ 
18:        end if
19:      end if
20:    end for
21:  else
22:    for each  $p_i \in r$  do
23:      if  $r_{p_i} \notin T$  or  $esParadaTroncal(r_{p_i})$  then
24:         $r' \leftarrow$  construir nuevo recorrido insertando  $o$  en la posición
            $p_i$ 
25:        for each  $p_j \in r'$  do
26:          if  $r_{p_j} \notin T$  or  $esParadaTroncal(r_{p_j})$  then
27:             $r'' \leftarrow$  construir nuevo recorrido insertando  $d$  en la
              posición  $p_j$ 
28:            if  $costo(r'') < costo(r_{candidato})$  then
29:               $r_{candidato} \leftarrow r''$ 
30:            end if
31:          end if
32:        end for
33:      end if
34:    end for
35:  end if
36: end for
37: return  $r_{candidato}$ 
end Inserción

```

Ilustración 8 Método de Inserción de Pares para EPIA

3.3 Implementación del algoritmo

Inicialmente se realizó una evaluación de los lenguajes *Java* y *Python* como posibles lenguajes de programación para la implementación del algoritmo. La investigación de cada lenguaje se basa fuertemente en las librerías para manipulación de grafos existentes para cada lenguaje. Algunas de las librerías evaluadas son *JGraphT* [16], *Guava* [17] y *Neo4j* [18], para Java, *graph-tool* [19] y *NetworkX* [20] para Python.

Debido a las funcionalidades de manejo de shapefiles (archivos con el formato ESRI Shapefile (SHP), que es el formato estándar para el intercambio de información geográfica entre Sistemas de Información Geográfica [21]) y la simplicidad para manipulación de grafos de *NetworkX*, es que se toma la decisión de implementar el algoritmo en el lenguaje *Python 3*.

A continuación, se listan los diferentes paquetes utilizados, su versión y su propósito:

- *NetworkX* – v2.4 – paquete Python para la creación, manipulación y procesamiento de grafos, que permite la utilización de shapefiles como fuente de datos.
- *pandas* [22] – mínima v0.22 – paquete Python para análisis y manipulación de datos, utilizado para manipular la matriz OD.

3.3.1 Metadatos a nivel de implementación

Como se muestra en la *Sección 2.3*, los nodos y aristas son componentes centrales en la representación de la red. A nivel de la implementación, es necesario agregar metadatos a dichos elementos de manera tal de etiquetarlos, brindándoles así, cierta semántica a los mismos.

A continuación, se describen los metadatos que se agregan a cada uno de los elementos de la red que le permiten al algoritmo identificar y procesar cada uno de ellos:

Nodo

- Centroide: Indica si un nodo es de tipo centroide o no.
- Troncal: Indica si el nodo pertenece a la red troncal o no. Utilizado para identificar la red troncal.
- Parada: Indica si un nodo troncal es parada o no. Utilizado para establecer puntos de conexión a la red troncal.

Arista

- Walking path: Indica si una arista es de tipo walking path o no. Utilizada para conectar nodos centroides con la red de calles.
- Largo: Indica el largo en kilómetros de una arista.
- Weight: Indica el costo en $\text{km/vel}_{\text{rel}}$ de una arista.

3.4 Detalles relevantes de implementación

En esta sección se detallan algunas mejoras de desempeño realizadas al código posterior a la primera versión funcional del mismo. Se considera necesario mencionar estas mejoras debido al costo computacional del algoritmo, principalmente dado por el componente de inserción de pares, que en cada iteración debe evaluar todas las posiciones de todos los recorridos generados hasta el momento, con lo cual agregar pares de demanda tiene una fuerte implicancia en lo que respecta a tiempos de ejecución. Sin realizar estas mejoras, ejecutar el algoritmo para el caso de estudio real sería inviable debido al tiempo que demoraría cada prueba. En la *Tabla 1* se ejemplifica el beneficio obtenido de aplicar las mejoras al algoritmo sobre el caso de prueba:

#Pares OD	Tiempo de ejecución Algoritmo	Tiempo de ejecución Mejorado	Beneficio
25	61 s	6 s	10 veces más rápido
50	500 s	8 s	62 veces más rápido
75	1071 s	11 s	97 veces más rápido

Tabla 1 Beneficio obtenido por las mejoras al código

Como se puede apreciar, las mejoras llevadas a cabo presentan grandes beneficios en cuanto al tiempo de ejecución y los mismos aumentan a medida que se utiliza una mayor cantidad de pares de demanda. Debido a esto, es que es posible ejecutar el caso de estudio completo utilizado en este trabajo, el cual cuenta con 21.613 nodos, 36.332 aristas y 6.185 pares de demanda, en un tiempo de ejecución razonable.

Para poder evaluar las partes del algoritmo que más tiempo de ejecución requieren, se hizo uso de *line_profiler* [23] un módulo Python para hacer análisis de funciones, que permite visualizar para cada línea de código, cuántas veces es ejecutada, duración total y duración promedio.

Se presentan a continuación, las principales modificaciones realizadas:

- Mantener un diccionario de nodos y un diccionario de aristas, con sus respectivas características. El beneficio se obtiene debido a que las búsquedas son de orden uno en diccionarios, a diferencia de la estructura de datos de grafos en *NetworkX*.
- Ejecutar una única vez el algoritmo Dijkstra para todo nodo centroide al inicio del código, y mantener un diccionario que aloje los caminos y costos al resto de los nodos de la red. Esto evita ejecutar Dijkstra en cada iteración (y por lo tanto, incurrir en su costo asociado), permitiendo obtener los recorridos y costos de los caminos más cortos en orden uno.
- Refactorización de código para reducir la cantidad de veces en que algunas de las funciones son ejecutadas, mediante la realización de cálculos intermedios y pasaje de argumentos entre funciones con los resultados.

Validación del algoritmo

En este trabajo se busca utilizar una representación de la realidad con un alto nivel de detalle, con el fin de cumplir con el objetivo de aplicar el algoritmo EPIA sobre un caso de estudio real, para una ciudad de mediano o gran porte. Dado que el caso de estudio real completo es complejo, tanto en estructura como en tamaño, es necesario definir un caso de prueba de menor tamaño y complejidad mediante el cual sea posible validar y verificar el modelo, y su implementación.

4.1 Red de casos de prueba

Para la validación del algoritmo fue seleccionado un subconjunto de la red de calles de la ciudad de Montevideo, el cual se visualiza en la *Ilustración 9*. El principal motivo para esta selección fue, en primera instancia, contar con una prueba de concepto funcional para el algoritmo. Para ello se seleccionó la zona centro-sur de la ciudad de Montevideo como región de prueba, tomando como único corredor troncal el correspondiente a la Avenida 18 de Julio (*Ilustración 10*).

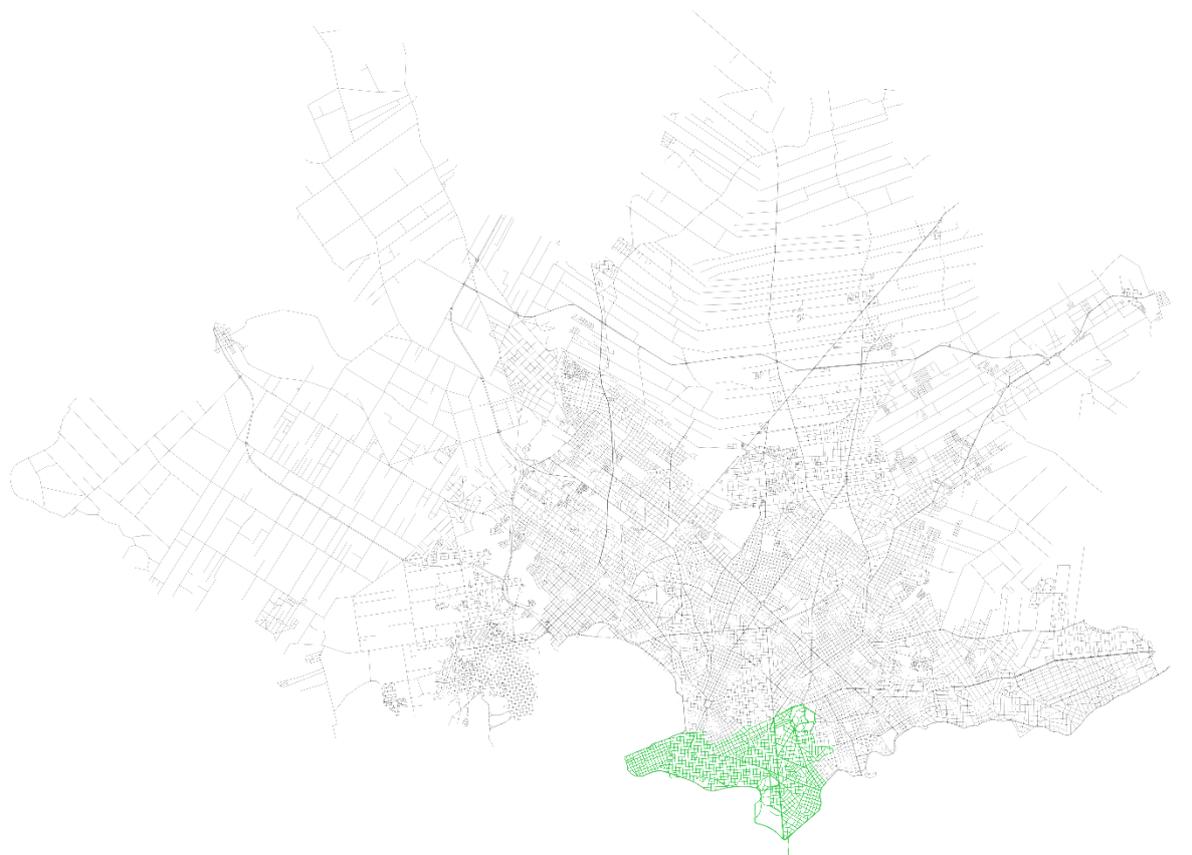


Ilustración 9 Subconjunto seleccionado de la red de calles de Montevideo

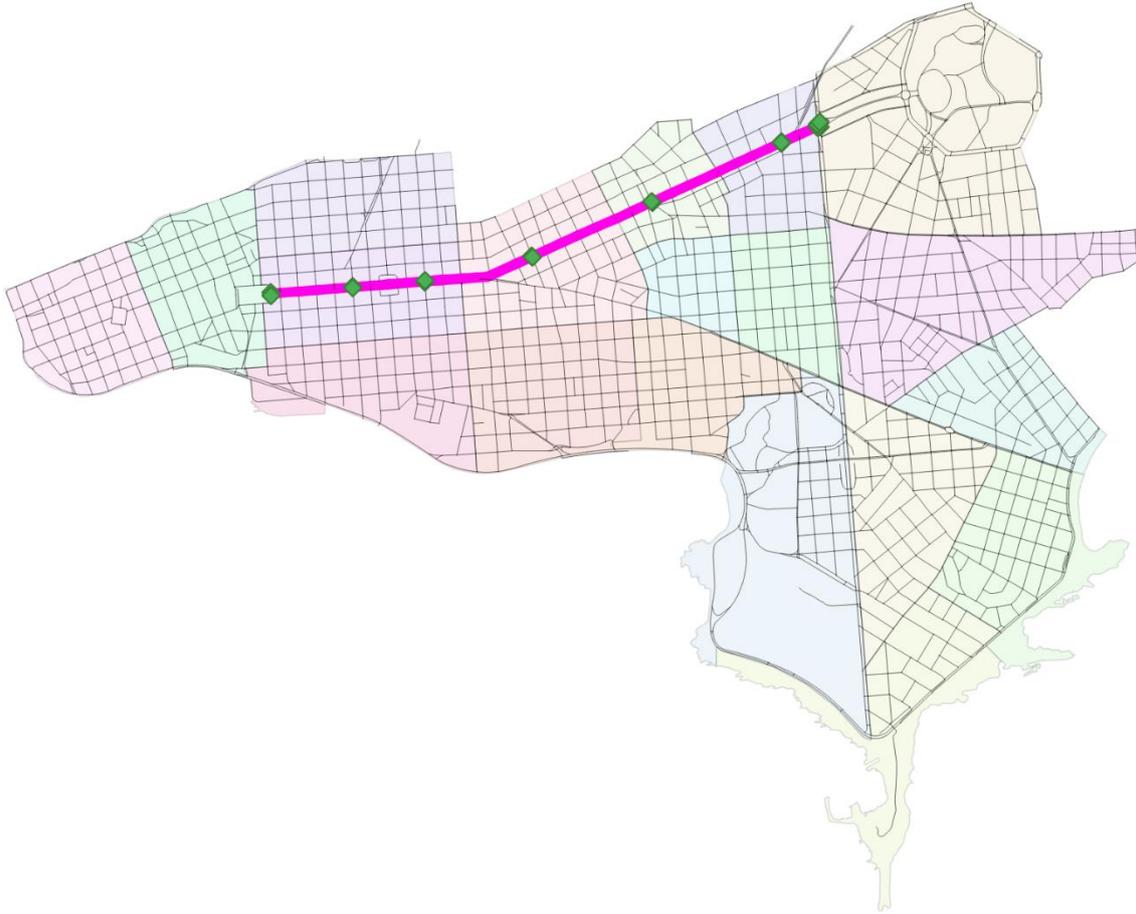


Ilustración 10 Red de calles y corredor troncal de zona centro-sur

Con esta selección, del grafo utilizado para representar la red completa, el cual cuenta con 36.332 aristas y 21.613 nodos, se logra trabajar con tan solo el 10% (aproximadamente) de los elementos de la red. El hecho de tener un caso de prueba con una red de tamaño reducido impacta significativamente en la cantidad de pruebas que se pueden realizar en un determinado tiempo, ya que es posible obtener soluciones en un menor tiempo de ejecución, permitiendo validar soluciones rápidamente.

Por otro lado, la zonificación definida por las *Zonas de Análisis de Tráfico (ZAT)* provista por el InCo, divide la región de prueba en 19 zonas (*Ilustración 11*). Para cada una de las zonas se asigna un identificador y se crea un centroide de zona, que es un punto imaginario el cual actúa como concentrador de demanda y servirá como origen y destino de los viajes interzonales.

Cabe resaltar en este punto que, a lo largo de toda la prueba de concepto, la demanda de viajes interzonales es arbitraria pues lo que se busca en esta instancia es la validación de la generación de recorridos entre zonas, independientemente del número pasajeros a transportar en cada recorrido.

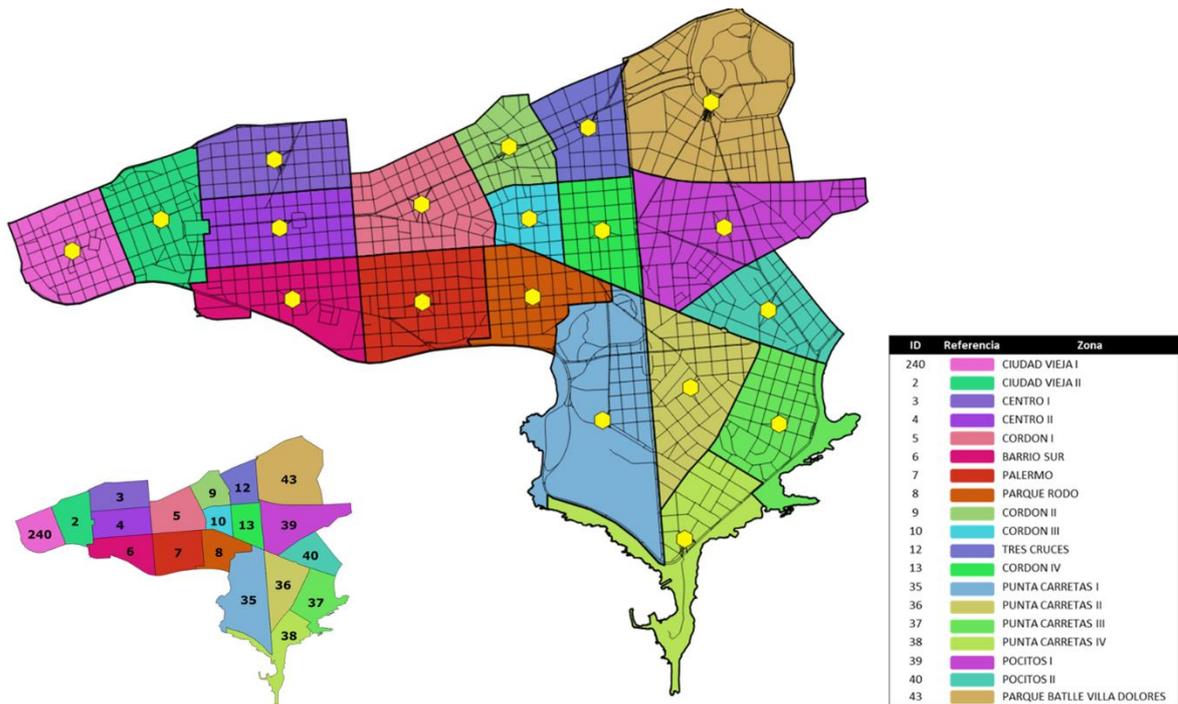


Ilustración 11 Zonificación utilizada para la validación del algoritmo

4.2 Casos de prueba

A continuación, se presenta un listado de casos de prueba que se consideran adecuados y suficientes para validar las principales características del algoritmo implementado, por medio de la visualización de los recorridos generados por el mismo. Si bien el presente listado no es exhaustivo, vale la pena aclarar que durante el transcurso de este trabajo se realizaron múltiples pruebas con un gran número de casos para comprobar la correctitud de la implementación del algoritmo.

En la *Tabla 2* se muestra la configuración de parámetros del algoritmo con los que se ejecutaron los casos de prueba, a menos que se indique lo contrario en algún caso en particular.

CM <i>(km/vel_{rel})</i>	RC <i>(km/vel_{rel})</i>	Velocidad Relativa
10,0	1,0	1,5

Tabla 2 Configuración de parámetros estandar para casos de prueba

4.2.1 Recorridos de segundo nivel y recorridos totalmente incluidos en red troncal

#OD	Zona Origen	Zona Destino
1	38	39
2	4	12

Tabla 3 Matriz OD, caso de prueba 1

Por medio de estas pruebas se valida la generación de recorridos que tienen un comportamiento particular:

- Recorridos de segundo nivel no alimentadores, es decir, recorridos que satisfagan demanda sin conectarse a la red troncal.
- Recorridos que quedan totalmente incluidos en la red troncal.

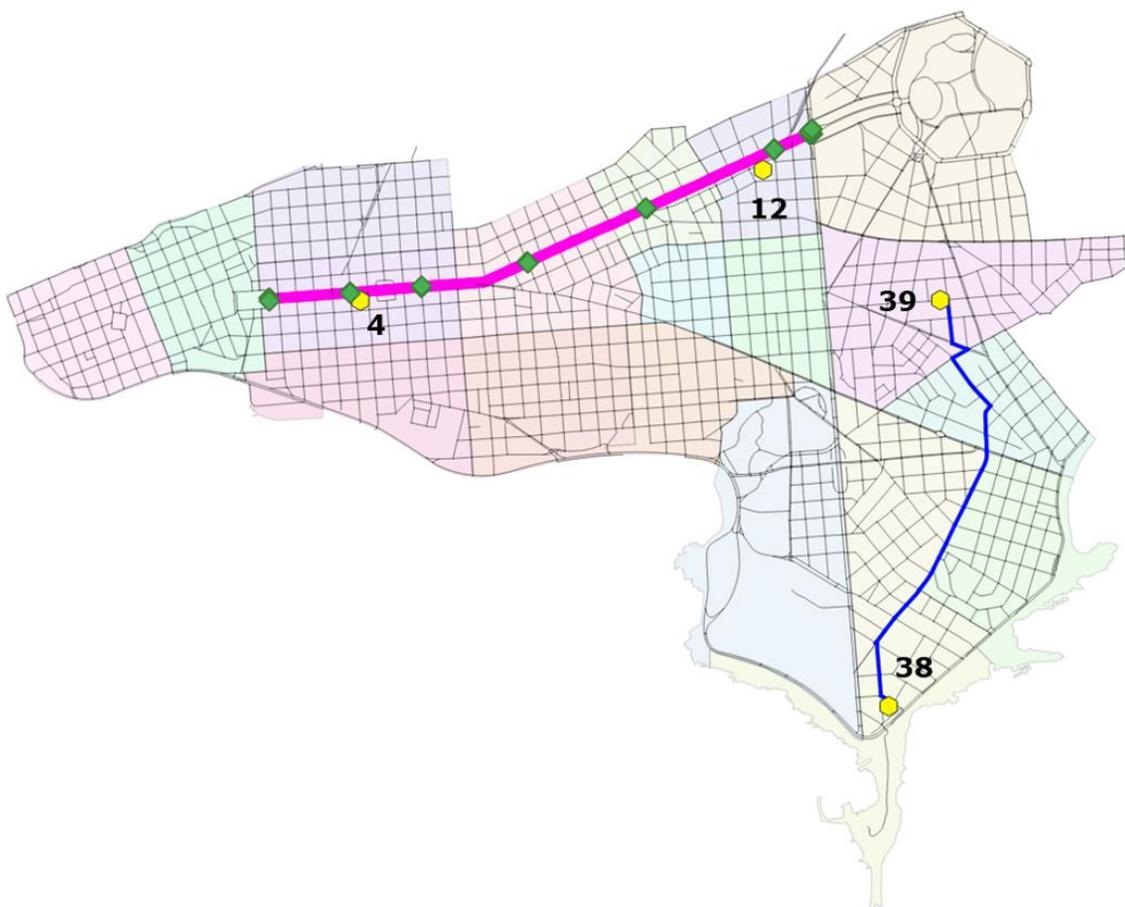


Ilustración 12 Caso de Prueba 1

En la *Ilustración 12* se presenta el resultado del caso de prueba que se detalla en la *Tabla 3*. Para el caso a) se observa un recorrido que tiene como origen la zona 38 y destino la zona 39, en este caso se ve como el algoritmo es capaz de generar un recorrido para un par de puntos de demanda sin necesidad de conectarse a la red troncal. Por su parte, para b) se busca generar un recorrido desde la zona 4 a la zona 12; como se puede ver, las paradas asignadas para dichas zonas coinciden con las paradas de la línea troncal (puntos verdes), y dado que el mejor recorrido posible se hace

íntegramente utilizando la troncal, el algoritmo no genera ningún recorrido adicional para este par origen-destino.

4.2.2 Efecto de la velocidad de la red troncal

#OD	Zona Origen	Zona Destino
1	6	10

Tabla 4 Matriz OD, caso de prueba 2

Por medio de estas pruebas se validan los efectos que provoca el cambio del factor de velocidad relativa sobre la generación de recorridos. A modo de ejemplo, se ejecuta un caso de prueba del algoritmo para el mismo par origen-destino, desde la zona 6 a la zona 10, pero variando la velocidad relativa de la red troncal.

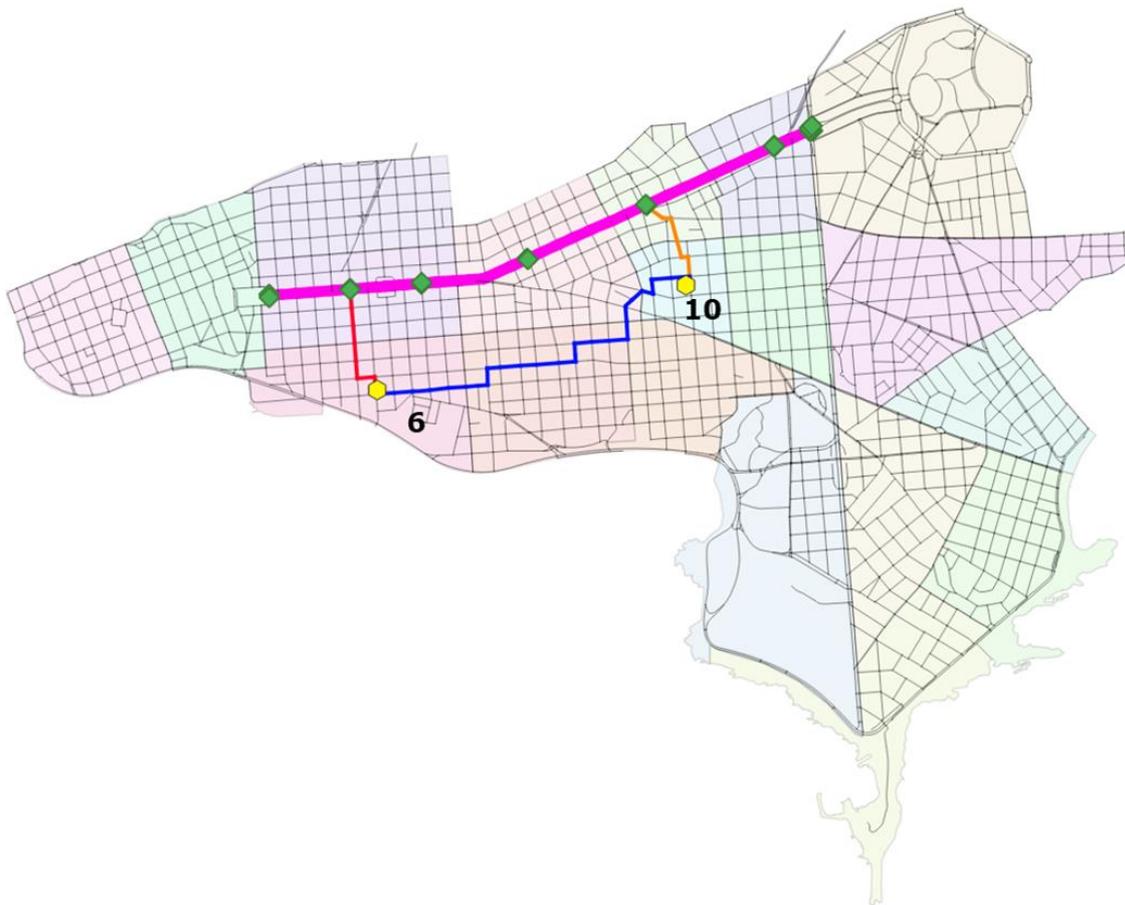


Ilustración 13 Caso de Prueba 2

En primera instancia cuando el factor de velocidad relativa de la red troncal es de 1,5 veces más rápida que la velocidad promedio de la red de segundo nivel, se puede ver que el algoritmo genera un recorrido directo entre origen y destino (azul), sin hacer uso de la troncal, pues no le es conveniente.

Sin embargo, en una segunda ejecución, cuando el factor de velocidad relativa es de 2,5 veces más rápida, se observa que el algoritmo genera dos recorridos alimentadores como solución (primer tramo rojo y segundo tramo naranja), haciendo uso de la línea troncal, ya que es mucho más rápida, y por ende tiene un costo menor en tiempo de viaje para el usuario.

4.2.3 Inserción de pares

Por medio de estas pruebas se valida el correcto funcionamiento del componente de inserción de pares.

En la *Ilustración 14* se presenta el resultado de un ejemplo de ejecución del algoritmo con el componente de inserción de pares deshabilitado. Como se puede ver, se construyen dos recorridos directos de menor costo posible:

#Recorrido	Color	Zona Origen	Zona Destino	Costo de Usuario (km/vel _{rel})
1	Azul	6	12	2,444
2	Rojo	7	12	2,183

Tabla 5 Caso de Prueba 3, recorridos generados sin inserción de pares

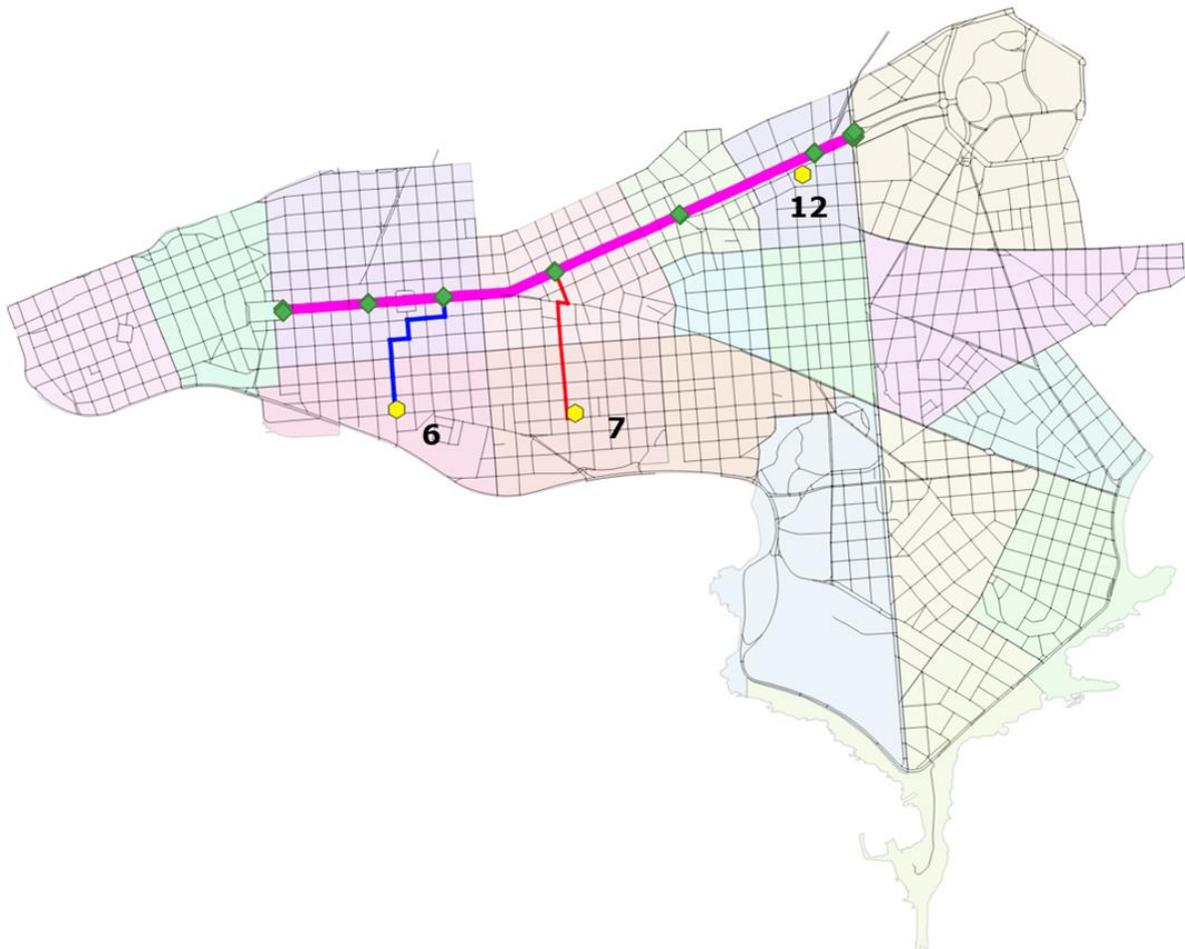


Ilustración 14 Caso de Prueba 3, sin inserción de pares

Si este fuera el resultado, para estos dos pares origen-destino, el costo de usuario acumulado sería de 4,627. En cambio, en la *Ilustración 15*, con el componente de inserción de pares habilitado se obtiene un único recorrido, que tiene a la zona 6 como origen, incluye a la zona 7 y finaliza en la zona 12.

Esto se debe a que, como se detalla en la *Sección 3.2*, el algoritmo EPIA evalúa si la diferencia entre el costo del recorrido candidato (construido utilizando el componente de Inserción) y el costo del recorrido a modificar (recorrido existente entre zona 7 y 12) es menor que el costo del camino de menor costo (entre 6 y 12). Dado que, para este caso, el costo de usuario para el recorrido candidato construido mediante EPIA es de $3,220 \text{ km/vel}_{rel}$, la evaluación resulta en: $3,220 - 2,183 < 2,444$. Por lo que el algoritmo entiende que resulta en menor costo construir un nuevo tramo para unirse a un recorrido existente, en vez de construir un recorrido directo para el par origen-destino.

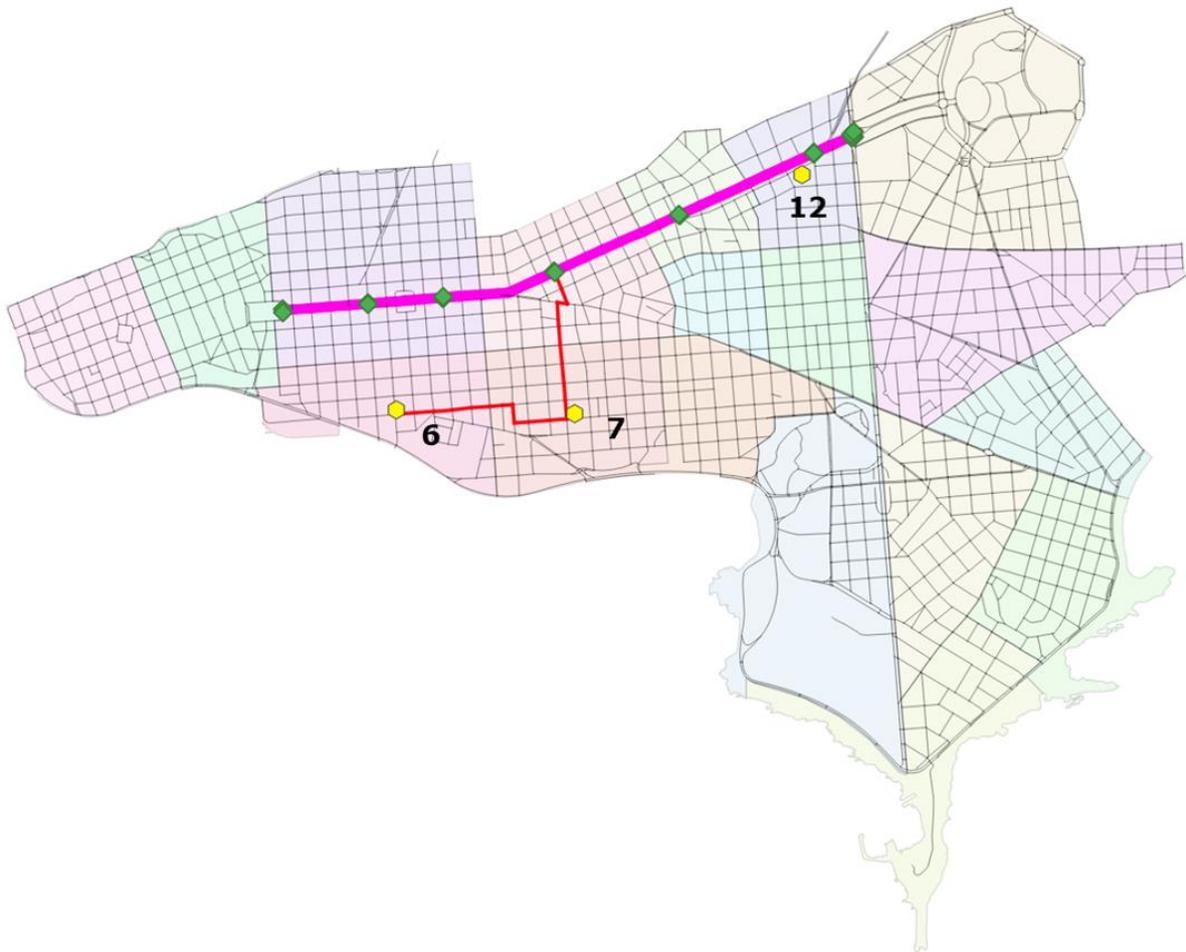


Ilustración 15 Caso de Prueba 3, con inserción de pares

4.2.4 Orden en el procesamiento de pares origen-destino

El orden en que se procesan los pares origen-destino incide directamente en el resultado, es decir, en los recorridos que se obtienen como solución. Dada la naturaleza ávida del algoritmo de construcción, el orden de las entradas de la matriz origen-destino a procesar afecta el resultado final.

A modo de ejemplo, si se procesa dos pares origen-destino con el siguiente orden.

#OD	Zona Origen	Zona Destino
1	7	12
2	6	12

Tabla 6 Matriz OD, caso de prueba 4

Se obtiene el recorrido alimentador que se visualiza en la *Ilustración 16*.

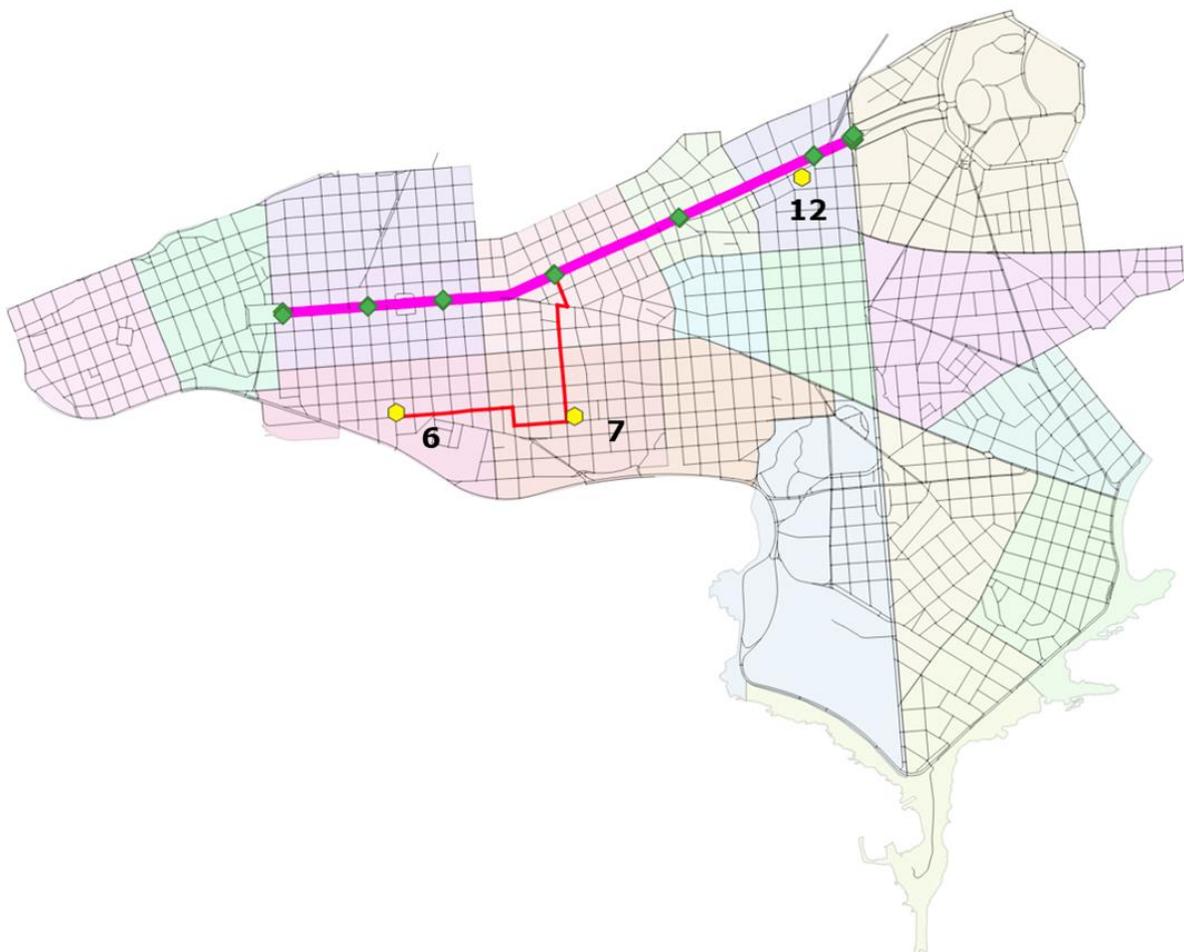


Ilustración 16 Caso de Prueba 4

Mientras que, por otro lado, si se invierte el orden en que se procesan los pares de demanda (*Tabla 7*), se obtiene un recorrido alimentador con un trazado distinto (*Ilustración 17*).

#OD	Zona Origen	Zona Destino
1	6	12
2	7	12

Tabla 7 Matriz OD, caso de prueba 4, orden inverso

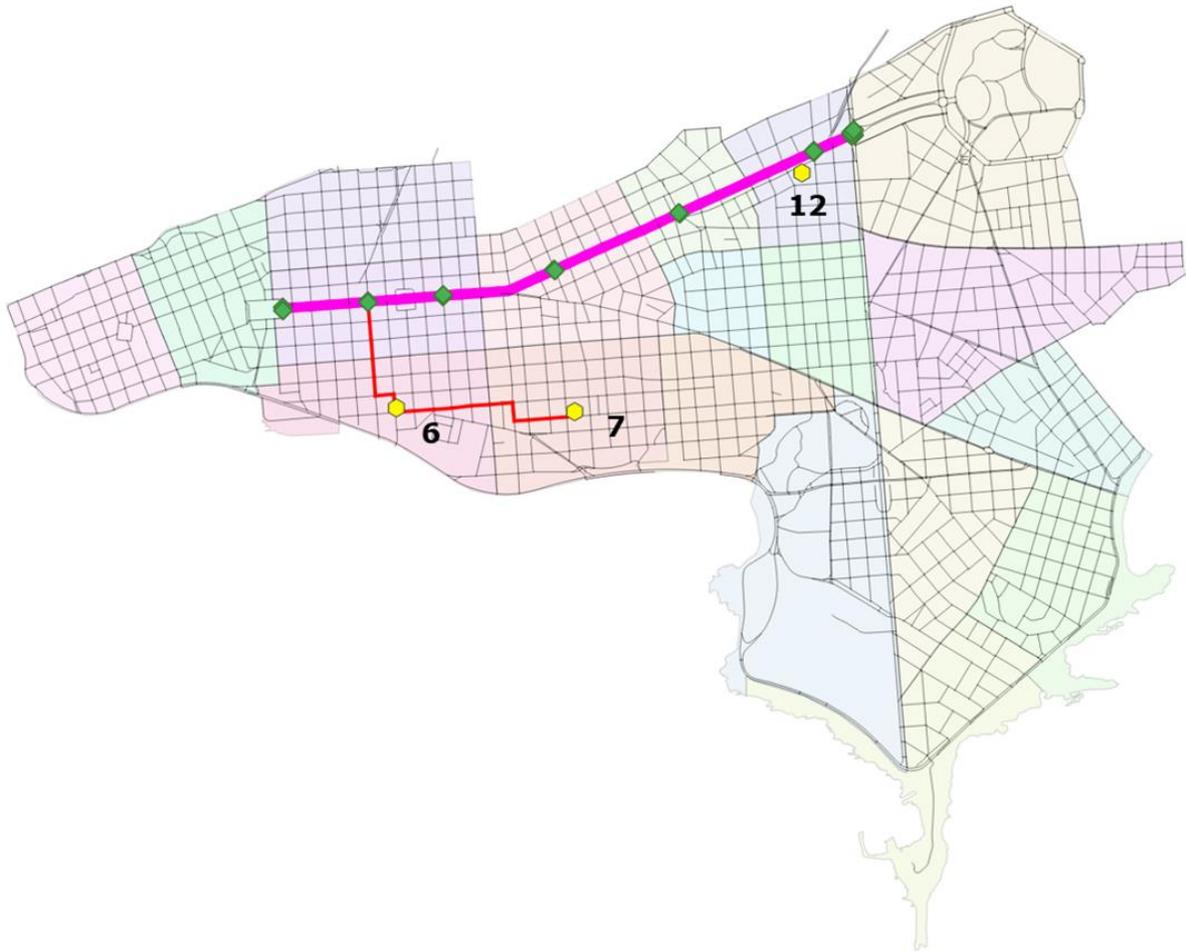


Ilustración 17 Caso de Prueba 4, orden inverso

Este ejemplo demuestra el efecto que genera del orden de procesamiento de la matriz origen-destino en los resultados obtenidos. Una consecuencia directa de este efecto es la importancia de que el ordenamiento de la matriz origen-destino sea en orden descendente con respecto a la demanda, de manera tal que, aquellos pares origen-destino que concentren mayor demanda tengan una mayor probabilidad de tener un recorrido más directo, pues los que concentren menor demanda irán insertándose en recorridos existentes (siempre que sea posible).

4.2.5 Efecto del costo máximo permitido por recorrido (CM)

El valor del costo máximo permitido por recorrido (CM , cota superior para el costo de usuario de cualquier recorrido) es un factor que razonablemente incide en la generación de los recorridos. Intuitivamente, un alto valor de CM , resulta en recorridos con mayor tiempo de viaje, que se traduce en recorridos más extensos, que en términos generales son convenientes para los operadores, pero no así para los usuarios. Por otro lado, un valor menor provoca que se generen recorridos de menor extensión.

En una primera ejecución, con el valor de CM igual a $10,0 \text{ km/vel}_{rel}$, y considerando los pares origen-destino en la *Tabla 8*, en la *Ilustración 18* se puede ver cómo el algoritmo genera un único recorrido con un costo de $5,727 \text{ km/vel}_{rel}$, que es capaz de satisfacer ambos pares de demanda.

#OD	Zona Origen	Zona Destino
1	6	43
2	2	39

Tabla 8 Matriz OD, caso de prueba 5

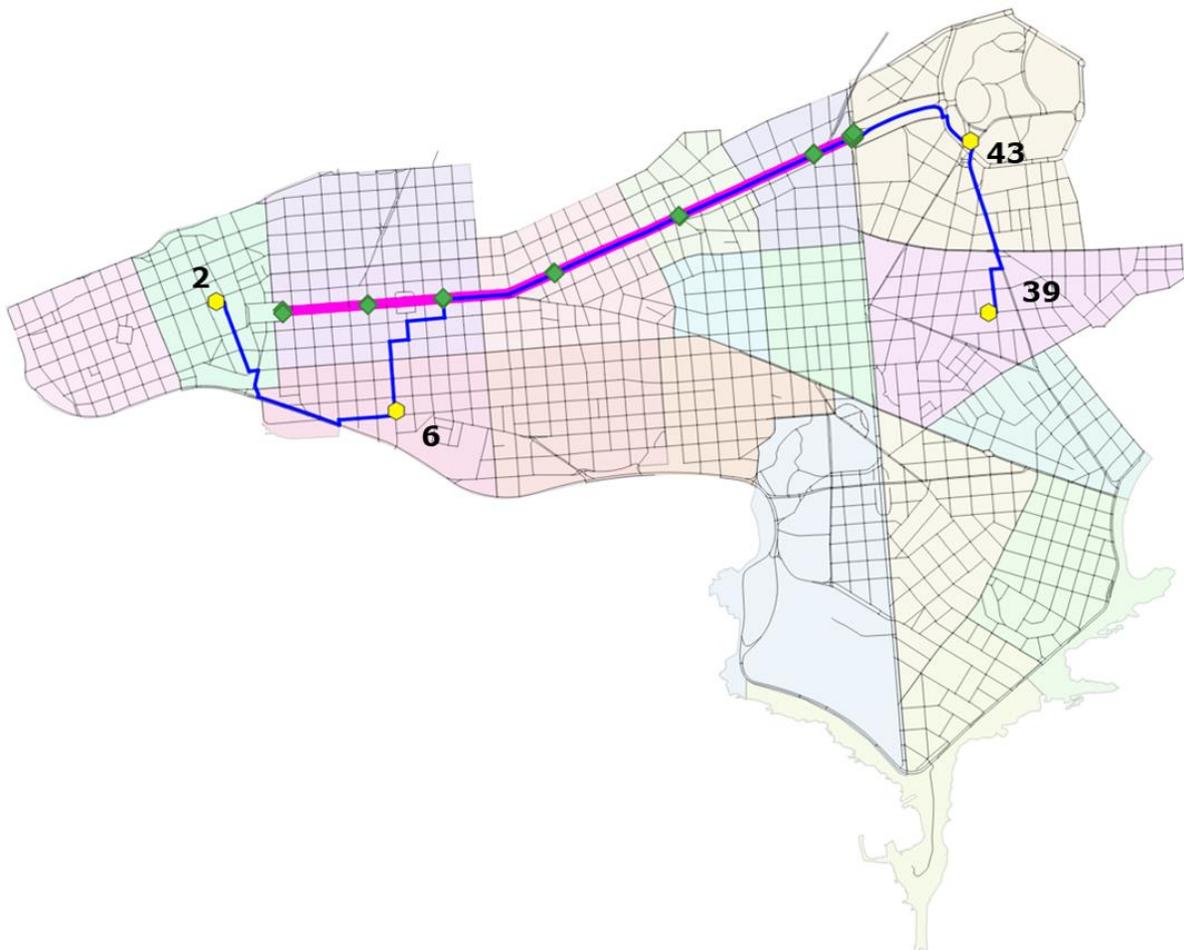


Ilustración 18 Caso de Prueba 5, $CM 10.0$

Sin embargo, cuando el valor de CM es 5.0 km/vel_{rel}, se obtienen los recorridos detallados en la *Tabla 9*.

#Recorrido	Color	Zona Origen	Zona Destino	Costo de Usuario
1	Azul	6	43	3,310
2	Rojo	2	39	4,068

Tabla 9 Caso de prueba 5, recorridos generados, CM 5.0

Claramente, la restricción en el costo hace que el algoritmo opte por crear un nuevo recorrido pues no es posible seguir extendiendo el recorrido existente (azul), por lo que es así que se genera un nuevo recorrido (rojo), como se visualiza en la *Ilustración 19*.

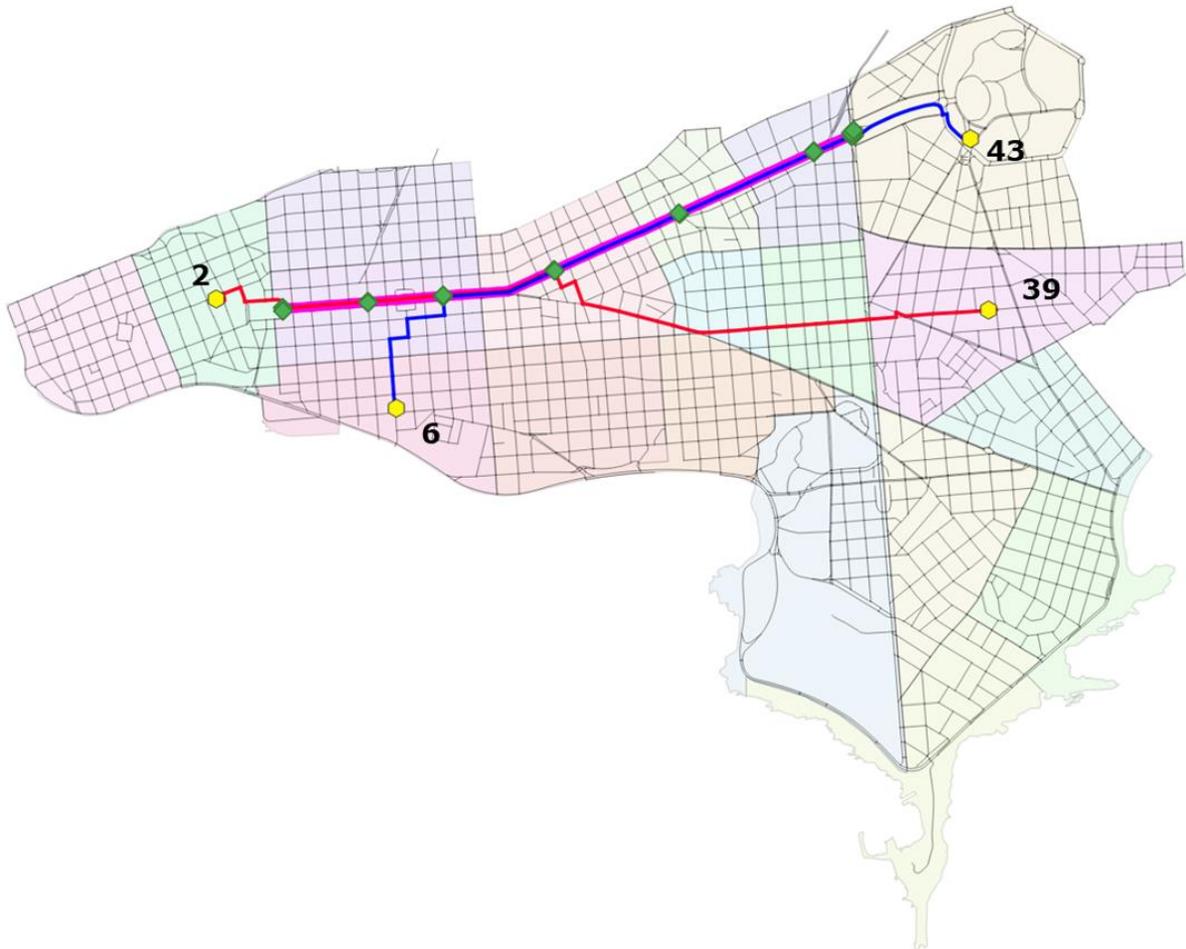


Ilustración 19 Caso de Prueba 5, CM 5.0

4.2.6 Efecto de la restricción cíclica (RC)

Lo que se busca con el factor de Restricción Cíclica (*RC*) es evitar la generación de recorridos cíclicos, es decir, que los extremos de un mismo recorrido estén lo suficientemente alejados entre sí. Por lo que *RC* conceptualmente indica la separación mínima que debe existir entre los extremos de todo recorrido generado como solución.

#OD	Zona Origen	Zona Destino
1	40	10
2	40	35
3	8	35

Tabla 10 Matriz OD, caso de prueba 6

En un escenario donde los pares origen-destino son los presentados en la *Tabla 10*, considerando *RC* igual a $1,0 \text{ km/vel}_{\text{rel}}$, el algoritmo es capaz de construir un único recorrido (rojo), desde el origen (zona 8) hasta el destino (zona 35), como se visualiza en la *Ilustración 20*, debido que el costo del camino más corto entre origen es de $1,247 \text{ km/vel}_{\text{rel}}$, superando así la cota inferior de *RC*.

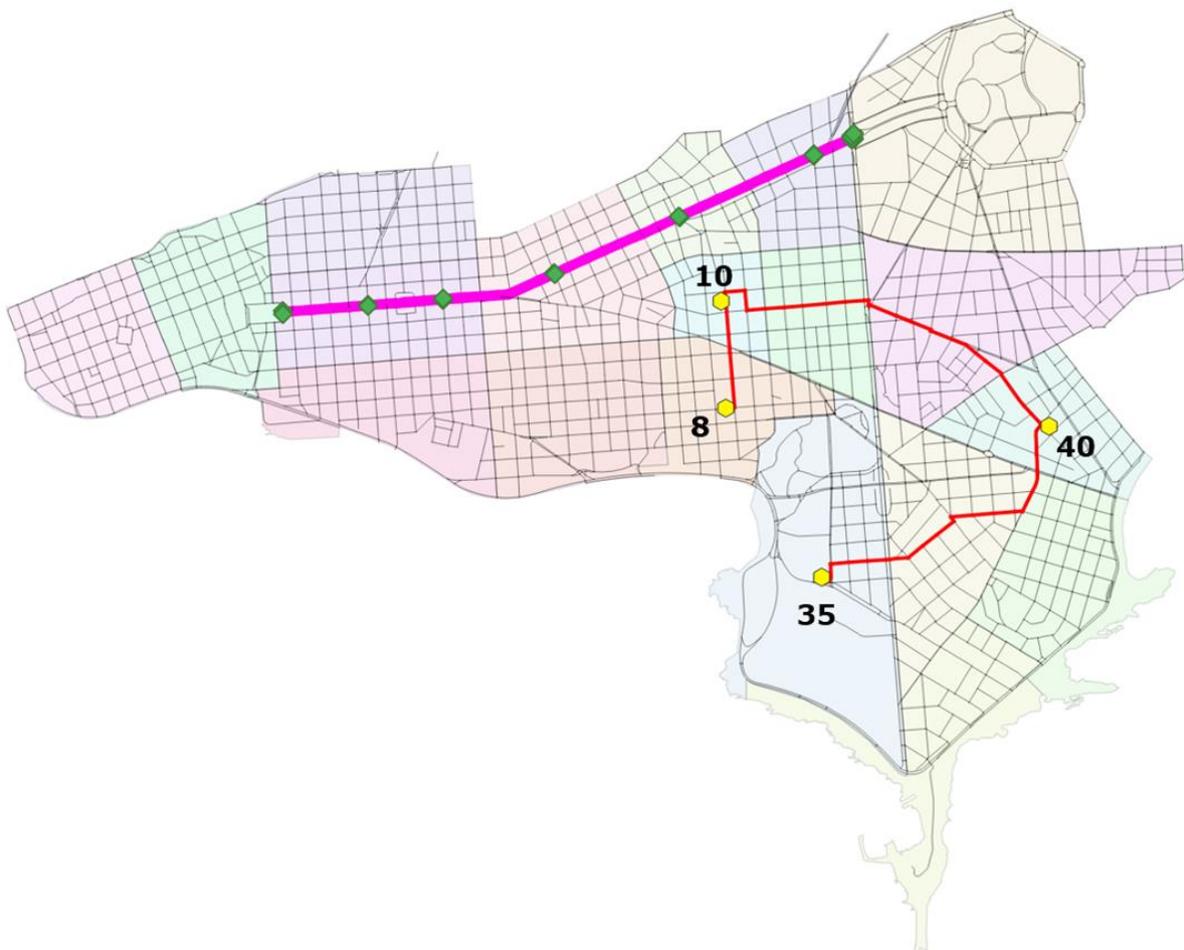


Ilustración 20 Caso de Prueba 6, RC 1.0

En cambio, si se considera un RC de $1,5 \text{ km/vel}_{rel}$, para exactamente los mismos pares origen-destino anteriores, el algoritmo genera ahora como solución dos recorridos distintos (*Ilustración 21*), pues construir un único recorrido como en la ejecución anterior ya no es válido dado que no cumpliría con la cota inferior de RC . Es así, que es necesario generar un nuevo recorrido para conectar la zona 8 con la 35. Notar que el par $(8,35)$ resultaba perjudicado en la solución anterior.

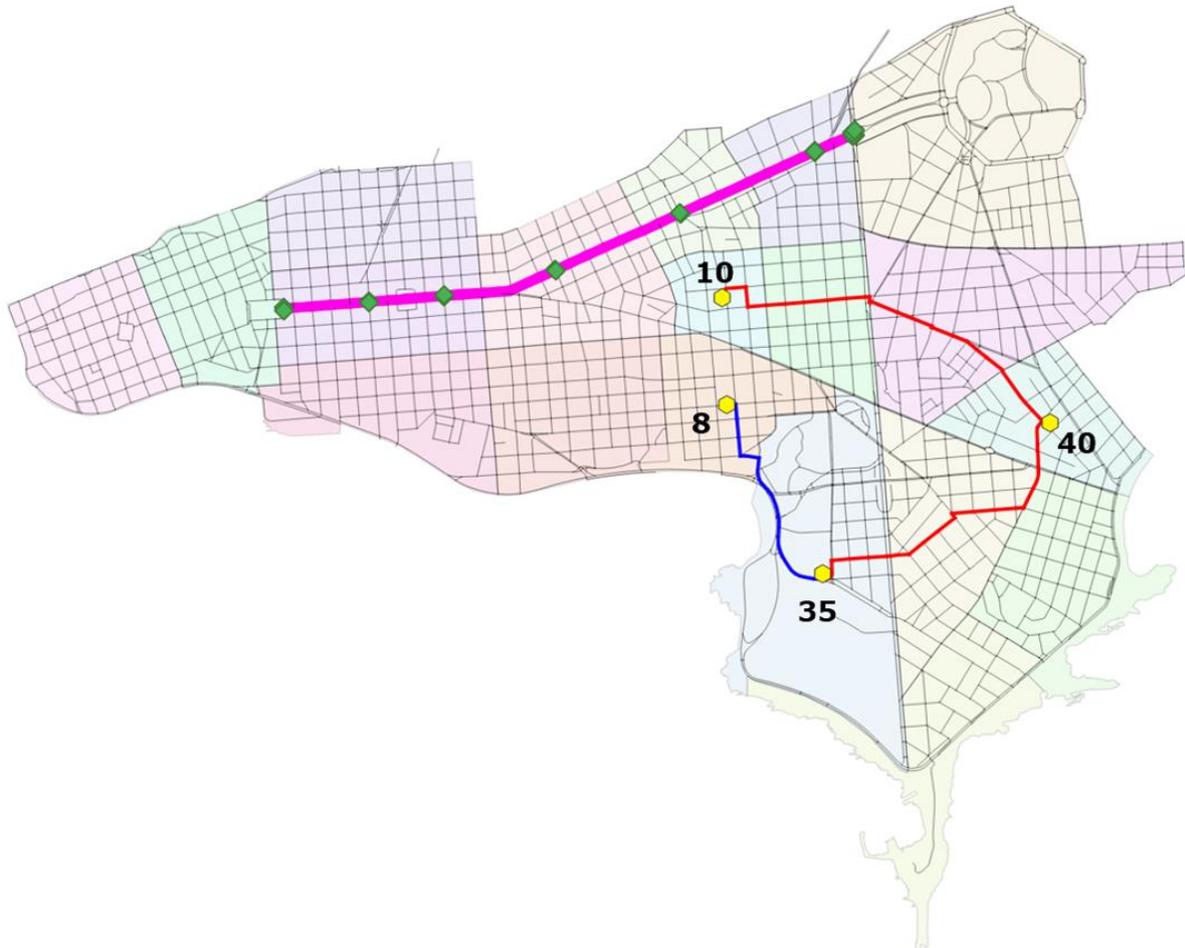


Ilustración 21 Caso de Prueba 6, RC 1.5

4.2.7 Visualización de recorridos para zona de prueba

Por último, resulta interesante visualizar los recorridos solución que se generan para toda la zona de prueba. Para eso, se utilizó un subconjunto de la matriz origen-destino conformado por los primeros 80 pares origen-destino que concentran mayor demanda, de forma tal que todas las 19 zonas del caso de validación pertenezcan al menos a un par origen-destino con demanda asociada.

En la *Tabla 11* se muestran los recorridos generados previo al procesamiento para obtención de recorridos de segundo nivel, que incluye la eliminación de los tramos de red troncal de los recorridos, así como también la unificación de recorridos que están totalmente embebidos en otros. En la *Ilustración 22* se observa el resultado final, es decir recorridos de segundo nivel, que se obtienen de dicho procesamiento.

#Recorrido	Zona Origen	Zona Destino	Zonas conectadas	Conexión con red troncal
1	240	35	240, 2, 4, 5, 10, 13, 43, 39, 35	Si
2	2	40	2, 4, 9, 5, 7, 8, 36, 37, 40	Si
3	9	36	9, 12, 43, 39, 40, 36	Si
4	2	38	2, 4, 5, 12, 9, 10, 8, 35, 38	Si
5	3	4	3, 4	No
6	12	13	12, 13	No
7	43	36	43, 39, 40, 37, 36	No
8	6	7	6, 7	No

Tabla 11 Caso de Prueba 7

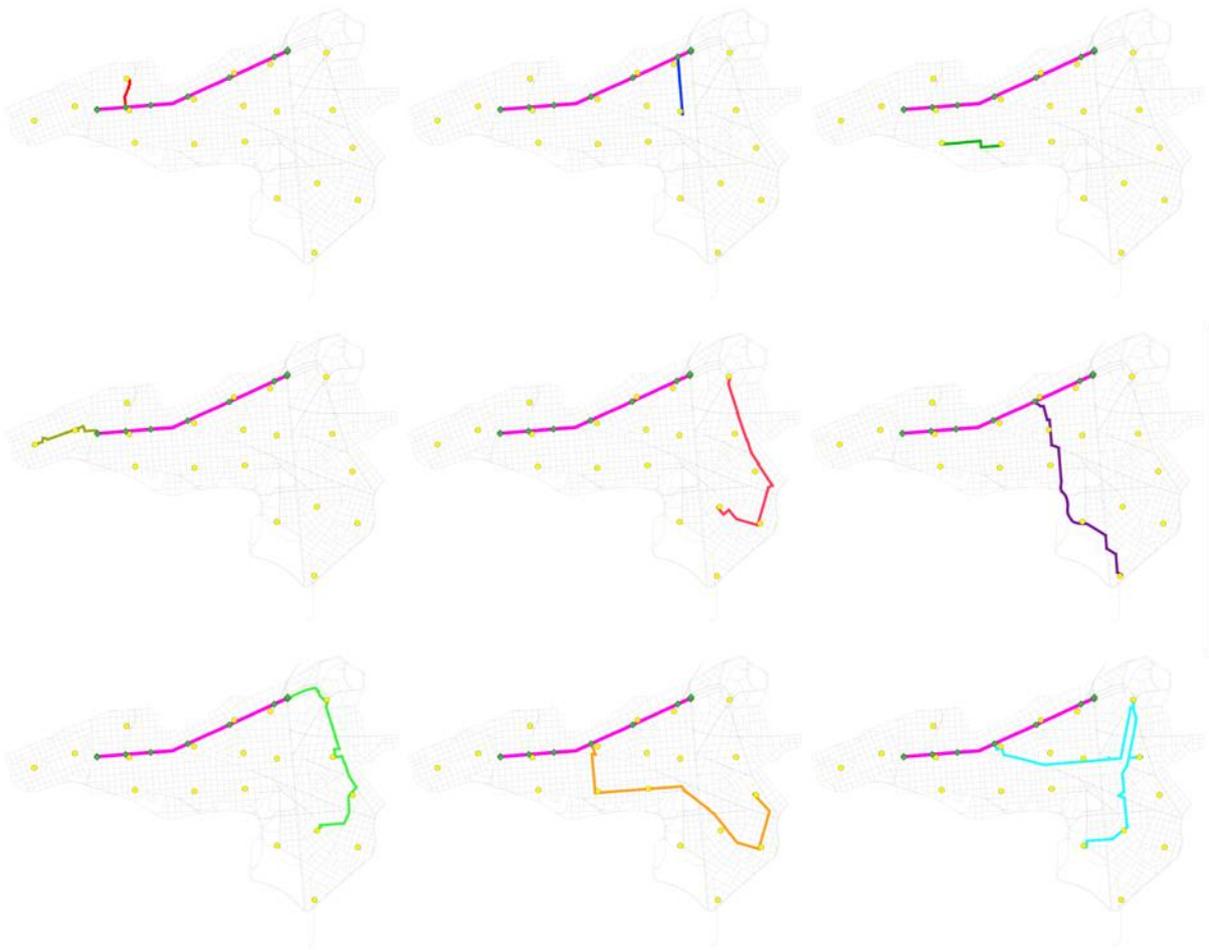


Ilustración 22 Caso de prueba 7

Caso de estudio

Uno de los objetivos de este trabajo es la aplicación de un método de generación de recorridos alimentadores a un caso de estudio real, para una ciudad de tamaño mediano o grande. Si bien los resultados obtenidos con el caso de prueba presentado en el *Capítulo 4*, demuestran la validez del algoritmo propuesto para la generación de los recorridos, no lo validan respecto a su aplicación a un caso real. Trabajar con un caso real permite, entre otras cosas, comparar las soluciones obtenidas por el algoritmo con la realidad actual. Trabajar con el caso de estudio completo permite a su vez analizar la viabilidad del algoritmo en términos de tiempo de ejecución, cuando el mismo es aplicado a una instancia de tamaño mediana-grande del problema.

El caso de estudio elegido es el del sistema de transporte público de la ciudad de Montevideo con la incorporación de corredores troncales utilizando un trazado aproximado al descrito en el Plan de Movilidad de la Intendencia de Montevideo [3]. Los siguientes factores motivan la elección de Montevideo como caso de estudio:

- Motivación personal de trabajar con la ciudad en la que vivimos, ya que trata de la realidad que experimentamos día a día, lo que a su vez simplifica tanto la construcción del caso en sí mismo como la validación de los trazados de los recorridos generados como solución. Además, desde la perspectiva del grupo de investigación resulta interesante la posibilidad de trabajar con la ciudad de Montevideo ya que es la única ciudad del país que cuenta con un sistema de transporte público con una complejidad que amerita un abordaje con el enfoque del presente proyecto.
- Las dimensiones de la ciudad y los requerimientos de demanda de transporte permiten el procesamiento de los datos en un tiempo razonable y están alineados a los objetivos de este trabajo.
- El hecho de contar con una definición de corredores troncales que aún no han sido implementados en su totalidad, presenta una oportunidad interesante para que el algoritmo pueda aportar al análisis en la toma de decisiones estratégicas previo a la construcción de los mismos.
- Se cuenta con datos accesibles tanto en lo que respecta a la red y la zonificación, como también una matriz de demanda con alto grado de detalle (a nivel de paradas), que permiten su obtención y procesamiento sin mayores inconvenientes.

5.1 Construcción del caso

Los datos del caso de estudio necesarios para la ejecución del algoritmo EPIA son:

Red: Es el grafo G no dirigido sobre el cual se definen los trazados de los recorridos. Para construirlo se requiere definir los nodos y arcos, con sus respectivos metadatos (descritos en la *Sección 3.3.1*), incluyendo el costo de los arcos, que representan el costo de viaje para los usuarios. Debido a esto es necesario disponer de información geográfica de la red vial de la ciudad.

Matriz origen-destino: Representa la demanda $D = \{D_{ij}\}$ entre pares de nodos centroide del grafo G , expresada en cantidad de viajes por unidad de tiempo.

Parámetros de diseño: Son los parámetros del modelo de optimización. Incluye cota superior para el costo de los recorridos (CM), factor de restricción cíclica para recorridos (RC) y coeficiente de velocidad relativa (vel_{rel}) de la red troncal respecto a la red de segundo nivel.

Es importante notar que la obtención y procesamiento de los datos de la red y la matriz origen-destino es una tarea compleja, que además implica la manipulación de un gran volumen de información.

5.1.1 Zonificación de la región de estudio

Cómo se menciona en la *Sección 2.2*, el FBNDP no considera la naturaleza interzonal de la demanda, motivo por el cual el concepto de zonificación no presenta grandes complejidades al problema. De la misma manera, debido a que en este trabajo se concibe la demanda a nivel de paradas (troncal y ómnibus), dejando de lado la obtención de los datos, construir la matriz origen destino tampoco presenta una complejidad extra al problema.

En cambio, de manera similar al TNDP, una de las decisiones más importantes que se presentan al comienzo del proceso de modelado de los datos para el EFBNDP, es la relativa al nivel de detalle a ser adoptado [4]. Las decisiones que se toman en esta etapa determinan en gran medida el proceso de construcción de la red y de la matriz origen-destino. Existe un conjunto de criterios aceptados para la división en zonas de una región de estudio. Estos criterios están enfocados a estudios de transporte de propósito general, involucrando varios modos de transporte, trabajando generalmente en base al modelo de transporte en etapas (generación distribución, división modal y asignación) [4].

En la bibliografía consultada para el FBNDP no se encuentran detalles acerca de la preparación de la red o la demanda, por lo que los criterios aplicados en este trabajo fueron seleccionados de modo que se adecuaron al caso de estudio presentado.

Para el nivel de detalle a adoptar, se evaluaron tres posibilidades:

Nivel de barrios: Se considera una zona por cada barrio de la ciudad. Los límites de barrios son los establecidos por el INE (*Ilustración 23*), que resulta en un total de 62 zonas. Tiene un grado de detalle que se podría utilizar para este caso, pero de hacerlo, se perdería una importante cantidad de información ya que algunos de los barrios (zonas) tienen un tamaño importante y atienden varias necesidades de demanda completamente diferentes.

los recortes realizados se obtiene un total de 136 zonas, lo cual continúa siendo más del doble de zonas que las definidas en el nivel de barrios (64).

5.1.2 Construcción de la matriz origen-destino

La información que refiere a la demanda para un estudio de transporte se expresa generalmente mediante una o varias matrices origen-destino, que representan las necesidades de viajes entre distintas zonas de la región de estudio [4]. En este estudio, se considera una matriz que representa el total de viajes de todo un mes, ya que se trata de la información que se encuentra disponible para la ciudad de Montevideo [9]. La misma está basada en la utilización de la tarjeta STM [25] durante el mes de Mayo de 2015 y se encuentra detallada a nivel de las paradas de ómnibus existentes en la red de transporte actual (*Ilustración 25*), lo que posibilita la generación de una matriz origen-destino con cualquiera que sea el detalle deseado para la zonificación, ya que luego se puede agregar la demanda de las paradas contenidas en la zona.

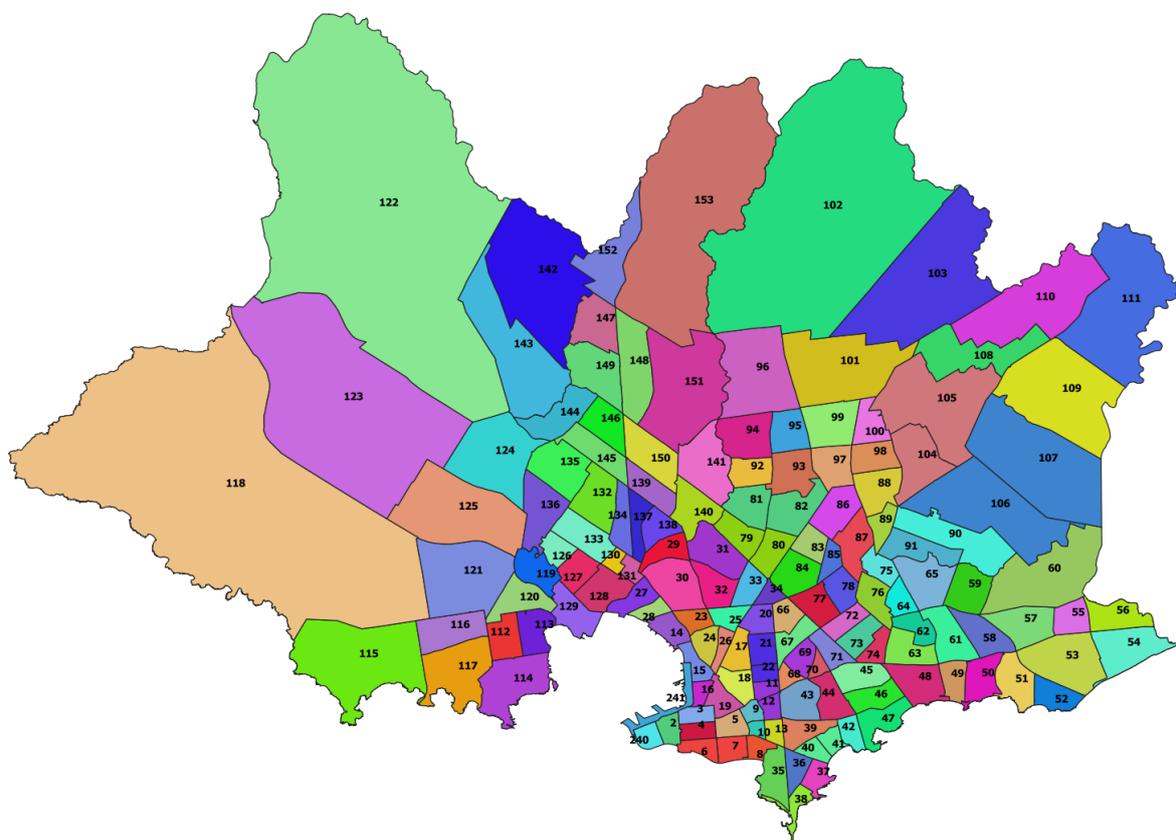


Ilustración 24 Delimitación de zonas de análisis de tráfico

La agrupación de paradas en zonas genera una correspondencia entre las entradas de la matriz original a nivel de paradas (de tamaño 1.100.675) y las entradas de una matriz a nivel de micro zonas (de tamaño 17.928). Teniendo en mente que se cuenta con 136 zonas, del total de combinaciones posibles (18.496), la matriz obtenida representa un 97% de los posibles pares origen-destino que pueden existir en la red. Al analizar la matriz, se encuentra que un 15% de las entradas (2.830 pares) tienen un valor menor a 30, lo cual se puede asumir como una persona realizando ese viaje una vez por día, durante todo el mes.

Se considera ruido a aquellos pares que tienen una demanda considerablemente menor al resto, que se introducen debido a que se trabaja con un espacio temporal muy amplio. Esto resulta en la aparición de viajes esporádicos, es decir que no forman parte de las necesidades de demanda diaria de la población, los cuales deben ser ignorados para evitar que se generen recorridos que no tendrían una utilidad real. Es por este motivo que se toma la decisión de ignorar de la matriz todos los pares con demanda menor a 300, que se asume equivalente a 10 viajes por día sostenidos a lo largo de todo el mes; esto a su vez es un valor cercano a 432, que corresponde a la demanda promedio calculada sobre la matriz completa.



Ilustración 25 Ubicación de paradas de ómnibus, Montevideo, Uruguay

De esta manera es que se llega a la matriz origen-destino definitiva a ser utilizada en el caso de estudio, que cuenta con 6.185 pares (representa un 34% de la matriz completa con respecto a la cantidad de pares). El trabajo de procesamiento de la matriz original para la obtención de la matriz definitiva se describe en detalle en el *Anexo I*.

5.1.3 Construcción de la red

La construcción de la red para el caso de estudio se realiza a partir de información de la red vial disponible como parte del conjunto de datos abiertos [8]. Dicha red es un insumo fundamental para el EPIA, por lo que la correctitud y consistencia de la red generada es imprescindible.

En primera instancia, la información de la red vial obtenida a través de los datos abiertos no es apta para el procesamiento que se requiere en este trabajo, ya que cuenta solamente con la representación de calles, es decir, únicamente artistas que representan ejes de calles completas. Por lo que es necesario generar información a nivel de nodos, que representan intersecciones de dichas calles.

Para lograr una red con una representación acorde a lo que se expresa en la *Sección 2.3*, se creó el procedimiento que se describe en profundidad en el *Anexo II*. Dicho procedimiento toma el shapefile de la red de calles de datos abiertos y lo procesa (haciendo uso de la librería NetworkX), para crear un grafo donde los nodos son automáticamente generados a partir de las intersecciones, permitiendo así exportar dos shapefiles que representan nodos y aristas. Además, el procedimiento agrega a la red: a) los centroides de zona correspondientes a la zonificación definida en la *Sección 5.1.1* y sus respectivos walking paths, y b) los metadatos necesarios definidos en la *Sección 3.3.1* tanto a nodos como a aristas.

Hay dos aspectos en la construcción de la red que resulta conveniente destacar:

- *Construcción de la red troncal*: La representación de la red troncal se llevó a cabo a través de un proceso manual haciendo uso de un Sistema de Información Geográfica, específicamente en este trabajo se utilizó la herramienta QGIS [10]. Una vez que se tiene los shapefiles que representan la red para el caso de estudio, se seleccionan los nodos designados como parte de la red troncal, es decir, los nodos que conforman los corredores troncales. En la *Ilustración 26* se muestra el resultado final, que es una aproximación muy ajustada de los corredores establecidos en el plan de movilidad de Montevideo (*Ilustración 2*). Concretamente, lo que se hace es seleccionar los nodos que formarán parte de la red troncal y editar el metadato que indica la pertenencia a la red troncal. Adicionalmente, se definen cada 500 metros aproximadamente, los nodos que actuarán como paradas de la red troncal, para los cuales también se edita el metadato correspondiente.

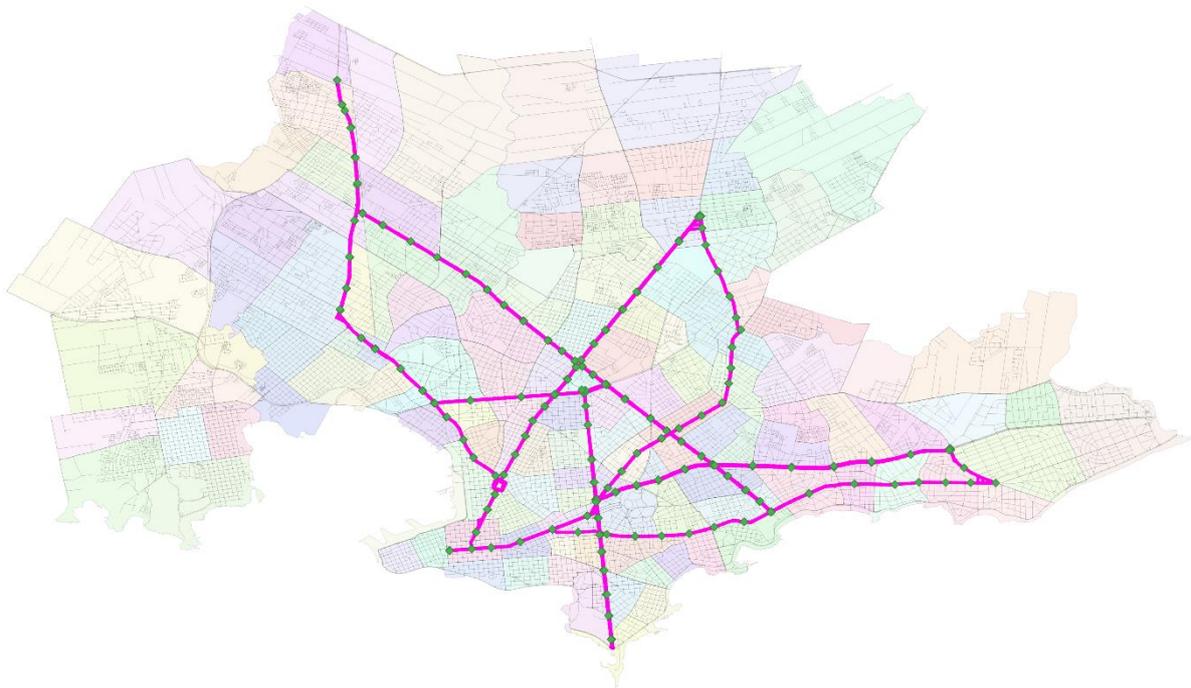


Ilustración 26 Corredores troncales definidos para el caso de estudio

- *Cálculo del costo de las aristas*: el costo asociado a las aristas es un componente esencial en el funcionamiento del algoritmo EPIA, y la forma en que se calcula dicho costo depende del tipo de arista. En el caso de las aristas que no pertenecen a la red troncal, el costo de estas es igual al largo en kilómetros. Para el caso de las aristas que pertenecen a la red troncal, el costo asociado surge de multiplicar el largo por un coeficiente de velocidad relativa; dicho coeficiente se calcula como la velocidad de la red alimentadora sobre velocidad de la red

troncal. Normalmente, la velocidad de la red troncal es mayor que la de la red alimentadora, por lo que el coeficiente es menor a 1, lo cual hace que el costo de las aristas troncales sea menor pese a tener un largo mayor eventualmente. Las aristas que son walking paths, tienen costo igual a cero. En todos los casos, la información del costo de las aristas se almacena en el metadato *weight*.

5.1.4 Línea Base

Con el fin de establecer una referencia para las pruebas y análisis que se presentan en la *Sección 5.4* se definió una configuración de factores del modelo, denominada como *línea base*. La elección de los valores de cada uno de ellos se realizó según el siguiente criterio:

- *Velocidad relativa de la red troncal*: Dado que la velocidad promedio de un ómnibus en una red común es de 26 km/h y la velocidad promedio de un ómnibus en un BRT es de 40 km/h [26], se define la velocidad relativa de la red troncal como 1,5 veces más rápida que la red alimentadora.
- *Restricción Cíclica*: $1,0 \text{ km/vel}_{rel}$, se tomó este valor empíricamente, ya que resulta conveniente tomar esa distancia mínima entre cualquier par origen-destino para todo recorrido.
- *Costo máximo por recorrido*: Teniendo en cuenta que actualmente las líneas de ómnibus de Montevideo tienen una extensión media de 16,4 km y máxima de 39,6 km [27], y puesto que además se recortaron algunas zonas para la zonificación, se definió $25,0 \text{ km/vel}_{rel}$ como valor de costo máximo por recorrido (contabilizado en un solo sentido).

5.2 Componente de análisis de resultados

Dada una solución factible $S = \{R\}$ para el modelo de optimización propuesto, es de gran interés para este trabajo obtener un conjunto de métricas que permitan realizar un análisis de la solución, más allá de su valor objetivo. A su vez, dado que no se presenta un algoritmo de mejora de soluciones, las métricas obtenidas son de vital importancia para evaluar distintas combinaciones de valores para los factores, de manera de poder comparar qué solución es mejor según una serie de criterios.

Para esto se construyó el componente de análisis que se describe en esta sección, donde las métricas calculadas se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Métricas de Función Objetivo
- Métricas de Recorridos
- Métricas de Cubrimiento
- Métricas de Clasificación de Viajes
- Métricas de Flujo

Donde, tal como se define en *Sección 2.8*:

- $l_a \in \mathbb{R}$ es el largo de toda arista $a \in A$ (conjunto de aristas de la red). $l_a \geq 0 \quad \forall a \in A$
- $x_a \begin{cases} 0 & \text{si } a \in T \\ 1 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad \forall a \in A$

En esta sección se hará uso de la definición recorridos alimentadores, para referirse tanto a recorridos alimentadores, como a recorridos de segundo nivel no alimentadores, indistintamente. Además, cuando se hace mención a la *red de recorridos*, se refiere a la unión de la red troncal con los recorridos que forman parte del conjunto solución. Al momento de detallar las fórmulas matemáticas correspondientes a cada métrica, se hará uso de la notación definida en la *Sección 2.4*.

5.2.1 Métricas de Función Objetivo

Estas métricas cuantifican los dos componentes de la función objetivo definida en la *Sección 2.7*: costo de usuarios y costo de operadores.

- *Costo de usuarios*: Se calcula como la sumatoria del costo de la trayectoria de los usuarios para todo par origen-destino $k \in K$ multiplicado por la demanda cubierta para dicho par origen-destino k .

$$\text{Costo de Usuarios} = \sum_{k \in K} d_k * SP_k(S \cup T)$$

- *Costo de operadores*: Representa el costo de operación. Se calcula como la suma de los costos de las aristas de los recorridos que forman parte del conjunto solución. Notar que la red troncal no reporta costos operativos (ya que como fuera definido anteriormente x_a es 0 para toda arista perteneciente a la troncal T).

$$\text{Costo de Operadores} = \sum_{s \in S} \sum_{a \in s} c_a * x_a$$

5.2.2 Métricas de Recorridos

Estas métricas cuantifican los recorridos generados. Las métricas definidas son:

- *Cantidad de recorridos generados*: Es la cantidad de recorridos generados por el algoritmo que incluyen a la red troncal, es decir, antes de procesar y retornar los recorridos solución (recorridos alimentadores o de segundo nivel).
- *Cantidad de recorridos alimentadores*: Es la cantidad de recorridos alimentadores generados como solución. Es la cardinalidad del conjunto solución S y es mayor o igual que la *Cantidad de recorridos generados*.

5.2.3 Métricas de Cubrimiento

Estas métricas buscan obtener la medida de cubrimiento de la red troncal y recorridos alimentadores sobre la red de recorridos. Las métricas definidas son:

- *Cubrimiento de la red troncal*: proporción de la red cubierta por la red troncal, respecto a la red de recorridos. Se calcula como la suma de la distancia de las calles que componen la red troncal, sobre la suma de la distancia de las calles que componen la red de recorridos, expresados en kilómetros.

$$\text{Cubrimiento de la red troncal} = \frac{\sum_{a \in SUT} l_a * (1 - x_a)}{\sum_{a \in SUT} l_a}$$

- *Cubrimiento de recorridos alimentadores*: proporción de la red cubierta por recorridos alimentadores, respecto a la red de recorridos. Se calcula como la suma de la distancia de las calles pertenecientes a algún recorrido alimentador, sobre la suma de la distancia de las calles que componen la red de recorridos, expresados en kilómetros.

$$\text{Cubrimiento de recorridos alimentadores} = \frac{\sum_{a \in SUT} l_a * x_a}{\sum_{a \in SUT} l_a}$$

Nota: ambas métricas son complementarias.

5.2.4 Métricas de Clasificación de Viajes

Estas métricas buscan cuantificar los viajes según si los mismos utilizan únicamente la red troncal, si utilizan la red troncal y recorridos alimentadores (los llamaremos mixtos), o si únicamente utilizan recorridos alimentadores. Asumiendo la siguiente definición para el total de la demanda, las métricas definidas son:

$$\text{Viajes Totales} = \sum_{k \in K} d_k$$

- *Viajes Troncales*: proporción de los viajes que utilizan únicamente la red troncal como modo de transporte para llegar de origen a destino. Se calcula como la suma de la demanda de aquellos pares tales que el camino más corto entre el origen y el destino, calculado sobre la red de recorridos, se compone únicamente de aristas pertenecientes a la red troncal, sobre la demanda total.

$$\text{Viajes Troncal} = \frac{\sum_{k \in K} \text{recorridoTroncal}(SP_k(S \cup T))}{\text{Viajes Totales}}$$

- *Viajes Alimentadores*: proporción de los viajes que utilizan únicamente recorridos alimentadores como modo de transporte para llegar de origen a destino. Se calcula como la suma de la demanda de aquellos pares tales que el camino más corto entre el origen y el destino, calculado sobre la red de recorridos, no contiene ninguna arista perteneciente a la red troncal, sobre la demanda total.

$$\text{Viajes No Troncal} = \frac{\sum_{k \in K} \text{recorridoNoTroncal}(SP_k(S \cup T))}{\text{Viajes Totales}}$$

- *Viajes Mixtos*: proporción de los viajes que utilizan tanto la red troncal como recorridos alimentadores para llegar de origen a destino. Se calcula como la suma de la demanda de aquellos pares tales que el camino más corto entre el origen y el destino, calculado sobre la red de recorridos, se compone tanto de aristas que pertenecen como de aristas que no pertenecen a la troncal, sobre la demanda total.

$$\text{Viajes Mixto} = \sum_{k \in K} \text{recorridoMixto}(SP_k(S \cup T)) / \text{Viajes Totales}$$

Nota: $\text{Viajes Totales} = \text{Viajes Troncal} + \text{Viajes No Troncal} + \text{Viajes Mixto}$.

5.2.5 Métricas de Flujo

El flujo es la cantidad de demanda que atraviesa una arista de la red por unidad de tiempo. El flujo de una arista se calcula como la suma de la demanda de todos los pares origen-destino para los cuales su camino más corto pasa por ella multiplicado por su largo. Las métricas definidas son:

$$\text{Flujo Total} = \sum_{k \in K} \sum_{a \in SP_k(S \cup T)} l_a * d_k$$

- *Flujo Troncal*: proporción del flujo total que pasa por aristas de la red troncal.

$$\text{Flujo Troncal} = \sum_{k \in K} \sum_{a \in SP_k(S \cup T)} (1 - x_a) * l_a * d_k / \text{Flujo Total}$$

- *Flujo No Troncal*: proporción del flujo total que pasa por aristas de la red de segundo nivel.

$$\text{Flujo No Troncal} = \sum_{k \in K} \sum_{a \in SP_k(S \cup T)} x_a * l_a * d_k / \text{Flujo Total}$$

- *Flujo Troncal (Mixtos)*: corresponde a la misma métrica que *Flujo Troncal* calculada considerando únicamente aquellos viajes clasificados como *mixtos*.
- *Flujo No Troncal (Mixtos)*: corresponde a la misma métrica que *Flujo No Troncal* calculada considerando únicamente aquellos viajes clasificados como *mixtos*.

5.3 Plan de pruebas

El objetivo del plan de pruebas es obtener las métricas definidas en la *Sección 5.2*, ejecutando el algoritmo EPIA sobre el caso de estudio para diversas combinaciones de los factores del modelo. Una vez obtenidos los resultados de cada una de las pruebas, en la *Sección 5.4* se realiza un análisis de las distintas métricas, para así evaluar el impacto que genera cada uno de los factores. Además de los resultados numéricos, se evaluarán los recorridos generados mediante un análisis de las respectivas representaciones visuales que retorna el algoritmo.

Se define entonces el conjunto de pruebas que se detalla en la *Tabla 12*. Las siguientes pruebas merecen aclaración:

- *(1) Situación actual:* Se ejecuta el algoritmo con la configuración de la línea base, sobre la red vial tal como se encuentra en la actualidad, es decir, sin la red troncal ni las restricciones de conexión que se definen sobre la misma. Básicamente en esta prueba, no existe una diferenciación entre las calles que pertenecen o no a la red troncal, lo que permite al algoritmo generar recorridos no restringidos a la existencia de una red troncal.
- *(2) Red troncal sin beneficio de velocidad:* Se ejecuta el algoritmo con la configuración de la línea base, modificando el factor velocidad relativa de la red troncal, de manera que la red troncal sea **igual de rápida** que la red de segundo nivel.

Los criterios con los que se fijaron los valores de los distintos factores varían dependiendo del parámetro en cuestión:

- Velocidad Relativa (vel_{rel}): los valores fijados para este parámetro en el plan de pruebas se corresponden con la relación que existe entre las velocidades operacionales promedio de los distintos modos [26] [28]. Aproximadamente, en comparación con un ómnibus común, el BRT (Bus Rapid Transit) es 1,5 veces más rápido; el LRT (Light Rail Transit) es 2,0 veces más rápido; y el metro es 2,5 veces más rápido. Además, se fija el valor 5,0 de manera tal de poder experimentar con un caso extremo.
- Costo Máximo (CM): Dado que el valor estipulado en la línea base es de 25,0 km/ vel_{rel} es razonable hacer pruebas con un $\pm 20\%$ de variación en este factor, de ahí los valores 20,0 km/ vel_{rel} y 30,0 km/ vel_{rel} . Por otro lado, se fija el valor 38,0 km/ vel_{rel} de manera tal de poder experimentar con un caso extremo.
- Restricción Cíclica (RC): Se fijan arbitrariamente valores razonables para la restricción en la separación de los extremos de los recorridos solución.

#	Prueba	Velocidad Relativa	Costo Máximo (km/vel _{rel})	Restricción Cíclica (km/vel _{rel})
1	Situación Actual	N/A	25,0	1,0
2	Red Troncal sin Beneficio de Velocidad	1,0	25,0	1,0
3	Línea base	1,5	25,0	1,0
4	Velocidad Relativa: 2x	2,0	25,0	1,0
5	Velocidad Relativa: 2,5x	2,5	25,0	1,0
6	Velocidad Relativa: 5x	5,0	25,0	1,0
7	Costo Máximo: 38 km/vel _{rel}	1,5	38,0	1,0
8	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel}	1,5	20,0	1,0
9	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel}	1,5	30,0	1,0
10	Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	1,5	25,0	2,5
11	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x	2,0	20,0	1,0
12	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x	2,0	30,0	1,0
13	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x, Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	2,0	30,0	2,5
14	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x, Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	2,5	20,0	2,5
15	Costo Máximo: 38 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x	2,0	38,0	1,0
16	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x	2,5	20,0	1,0
17	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x	2,5	30,0	1,0
18	Costo Máximo: 38 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x	2,5	38,0	1,0

Tabla 12 Plan de Pruebas detallado

5.4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos tanto a nivel de métricas como recorridos generados para cada una de las pruebas definidas en el Plan de Pruebas (*Tabla 12*), los cuales son posteriormente analizados en la *Sección 5.5*.

5.4.1 Situación Actual

En la *Tabla 13* se muestran los resultados de la prueba (1) *Situación Actual* y en la *Ilustración 27* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	32.969.637
	Costo de Operadores	7.055
Recorridos	Recorridos generados	314
	Recorridos alimentadores	314
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	0%
	Cubrimiento Alimentador	100%
Clasificación de Viajes	Troncales	0%
	Alimentadores	100%
	Mixtos	0%
Flujo	Troncal	0%
	No troncal	100%
	Troncal (mixtos)	0%
	No troncal (mixtos)	0%

Tabla 13 Resultados de la Prueba 1



Ilustración 27 Visualización de recorridos generados de la Prueba 1

5.4.2 Red Troncal sin beneficio de velocidad

En la *Tabla 14* se muestran los resultados de la prueba (2) *Red Troncal sin beneficio de velocidad* y en la *Ilustración 28* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	34.885.501
	Costo de Operadores	4.167
Recorridos	Recorridos generados	294
	Recorridos alimentadores	838
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	17,75%
	Cubrimiento Alimentador	82,25%
Clasificación de Viajes	Troncales	8,06%
	Alimentadores	20,62%
	Mixtos	71,33%
Flujo	Troncal	39,02%
	No troncal	60,98%
	Troncal (mixtos)	40,98%
	No troncal (mixtos)	59,02%

Tabla 14 Resultados de la Prueba 2



Ilustración 28 Visualización de recorridos generados de la Prueba 2

5.4.3 Línea Base

En la *Tabla 15* se muestran los resultados de la prueba (3) *Línea Base* y en la *Ilustración 29* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	28.787.684
	Costo de Operadores	2.912
Recorridos	Recorridos generados	382
	Recorridos alimentadores	627
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	21,26%
	Cubrimiento Alimentador	78,74%
Clasificación de Viajes	Troncales	10,66%
	Alimentadores	15,59%
	Mixtos	73,75%
Flujo	Troncal	61,16%
	No troncal	38,84%
	Troncal (mixtos)	63,30%
	No troncal (mixtos)	36,70%

Tabla 15 Resultados de la Prueba 3



Ilustración 29 Visualización de recorridos generados de la Prueba 3

5.4.4 Velocidad relativa: 2x

En la *Tabla 16* se muestran los resultados de la prueba (4) *Velocidad relativa: 2x* y en la *Ilustración 30* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	24.874.528
	Costo de Operadores	2.509
Recorridos	Recorridos generados	372
	Recorridos alimentadores	572
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	23,50%
	Cubrimiento Alimentador	76,50%
Clasificación de Viajes	Troncales	11,48%
	Alimentadores	13,44%
	Mixtos	75,08%
Flujo	Troncal	66,31%
	No troncal	33,69%
	Troncal (mixtos)	67,74%
	No troncal (mixtos)	32,26%

Tabla 16 Resultados de la Prueba 4



Ilustración 30 Visualización de recorridos generados de la Prueba 4

5.4.5 Velocidad relativa: 2,5x

En la *Tabla 17* se muestran los resultados de la prueba (5) *Velocidad relativa: 2,5x* y en la *Ilustración 31* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	22.299.597
	Costo de Operadores	2.194
Recorridos	Recorridos generados	351
	Recorridos alimentadores	504
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	25,42%
	Cubrimiento Alimentador	74,58%
Clasificación de Viajes	Troncales	11,85%
	Alimentadores	13,10%
	Mixtos	75,05%
Flujo	Troncal	68,28%
	No troncal	31,72%
	Troncal (mixtos)	69,72%
	No troncal (mixtos)	30,28%

Tabla 17 Resultados de la Prueba 5

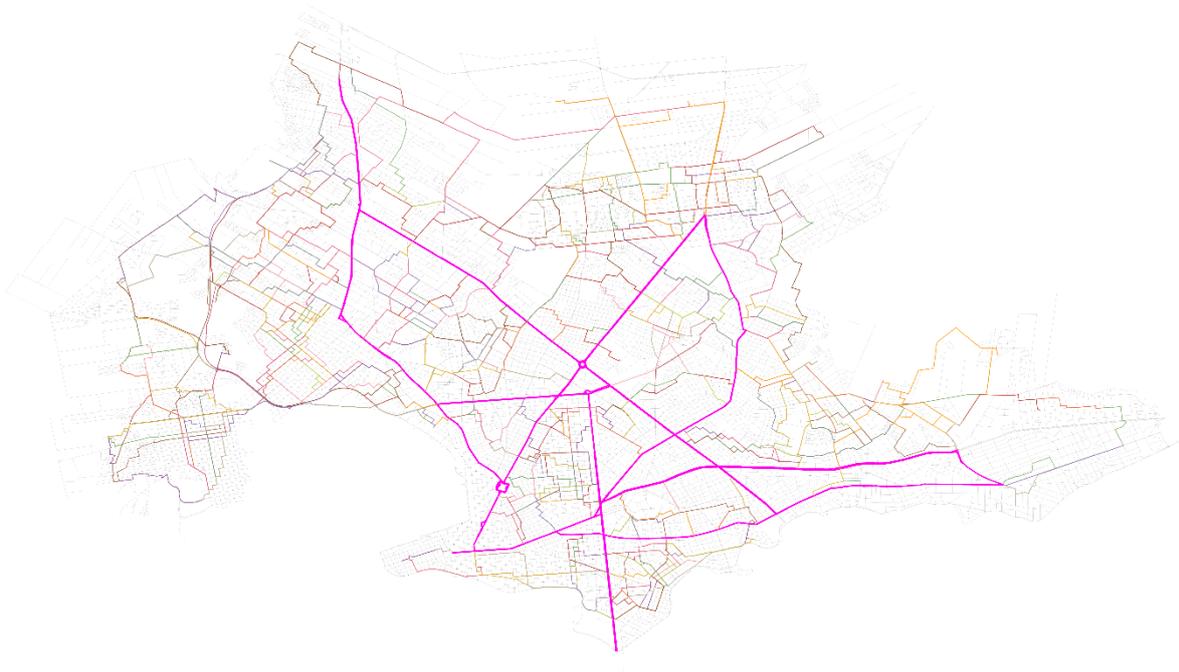


Ilustración 31 Visualización de recorridos generados de la Prueba 5

5.4.6 Velocidad relativa: 5x

En la *Tabla 18* se muestran los resultados de la prueba (6) *Velocidad relativa: 5x* y en la *Ilustración 32* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	16.911.108
	Costo de Operadores	1.724
Recorridos	Recorridos generados	550
	Recorridos alimentadores	419
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	27,71%
	Cubrimiento Alimentador	72,29%
Clasificación de Viajes	Troncales	11,85%
	Alimentadores	11,69%
	Mixtos	76,46%
Flujo	Troncal	70,63%
	No troncal	29,37%
	Troncal (mixtos)	71,79%
	No troncal (mixtos)	28,21%

Tabla 18 Resultados de la Prueba 6



Ilustración 32 Visualización de recorridos generados de la Prueba 6

5.4.7 Costo Máximo: 38km

En la *Tabla 19* se muestran los resultados de la prueba (7) *Costo Máximo: 38km* y en la *Ilustración 33* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	28.807.803
	Costo de Operadores	2.691
Recorridos	Recorridos generados	269
	Recorridos alimentadores	560
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	21,75%
	Cubrimiento Alimentador	78,25%
Clasificación de Viajes	Troncales	10,65%
	Alimentadores	15,50%
	Mixtos	73,85%
Flujo	Troncal	61,36%
	No troncal	38,64%
	Troncal (mixtos)	63,60%
	No troncal (mixtos)	36,40%

Tabla 19 Resultados de la Prueba 7



Ilustración 33 Visualización de recorridos generados de la Prueba 7

5.4.8 Costo Máximo: 20km

En la *Tabla 20* se muestran los resultados de la prueba (8) *Costo Máximo: 20km* y en la *Ilustración 34* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	28.786.138
	Costo de Operadores	2.902
Recorridos	Recorridos generados	490
	Recorridos alimentadores	642
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	21,07%
	Cubrimiento Alimentador	78,93%
Clasificación de Viajes	Troncales	10,66%
	Alimentadores	15,57%
	Mixtos	73,77%
Flujo	Troncal	61,17%
	No troncal	38,83%
	Troncal (mixtos)	63,35%
	No troncal (mixtos)	36,65%

Tabla 20 Resultados de la Prueba 8



Ilustración 34 Visualización de recorridos generados de la Prueba 8

5.4.9 Costo Máximo: 30km

En la *Tabla 21* se muestran los resultados de la prueba (9) *Costo Máximo: 30km* y en la *Ilustración 35* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	28.801.877
	Costo de Operadores	2.811
Recorridos	Recorridos generados	359
	Recorridos alimentadores	612
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	21,50%
	Cubrimiento Alimentador	78,50%
Clasificación de Viajes	Troncales	10,66%
	Alimentadores	15,20%
	Mixtos	74,14%
Flujo	Troncal	61,35%
	No troncal	38,65%
	Troncal (mixtos)	63,16%
	No troncal (mixtos)	36,84%

Tabla 21 Resultados de la Prueba 9



Ilustración 35 Visualización de recorridos generados de la Prueba 9

5.4.10 Restricción Cíclica: 2,5km

En la *Tabla 22* se muestran los resultados de la prueba (10) *Restricción Cíclica: 2,5km* y en la *Ilustración 36* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	28.801.217
	Costo de Operadores	2.794
Recorridos	Recorridos generados	338
	Recorridos alimentadores	607
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	21,65%
	Cubrimiento Alimentador	78,35%
Clasificación de Viajes	Troncales	10,66%
	Alimentadores	15,51%
	Mixtos	73,83%
Flujo	Troncal	61,17%
	No troncal	38,83%
	Troncal (mixtos)	63,38%
	No troncal (mixtos)	36,62%

Tabla 22 Resultados de la Prueba 10

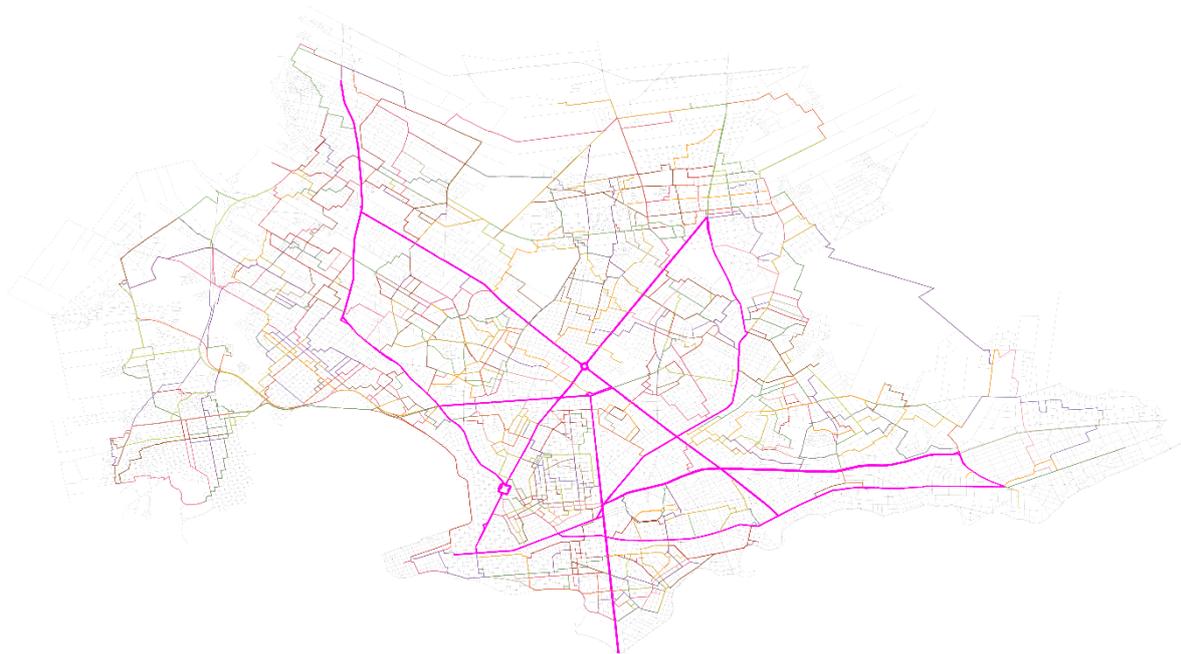


Ilustración 36 Visualización de recorridos generados de la Prueba 10

5.4.11 Costo Máximo: 20 km, Velocidad Relativa: 2x

En la *Tabla 23* se muestran los resultados de la prueba (11) *Costo Máximo: 20 km, Velocidad Relativa: 2x* y en la *Ilustración 37* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	24.872.867
	Costo de Operadores	2.474
Recorridos	Recorridos generados	382
	Recorridos alimentadores	545
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	23,39%
	Cubrimiento Alimentador	76,61%
Clasificación de Viajes	Troncales	11,44%
	Alimentadores	13,53%
	Mixtos	75,03%
Flujo	Troncal	66,21%
	No troncal	33,79%
	Troncal (mixtos)	67,71%
	No troncal (mixtos)	32,29%

Tabla 23 Resultados de la Prueba 11



Ilustración 37 Visualización de recorridos generados de la Prueba 11

5.4.12 Costo Máximo: 30 km, Velocidad Relativa: 2x

En la *Tabla 24* se muestran los resultados de la prueba (12) *Costo Máximo: 30 km, Velocidad Relativa: 2x* y en la *Ilustración 38* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	24.874.528
	Costo de Operadores	2.509
Recorridos	Recorridos generados	372
	Recorridos alimentadores	572
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	23,5%
	Cubrimiento Alimentador	76,5%
Clasificación de Viajes	Troncales	11,48%
	Alimentadores	13,44%
	Mixtos	75,08%
Flujo	Troncal	66,31%
	No troncal	33,69%
	Troncal (mixtos)	67,74%
	No troncal (mixtos)	32,26%

Tabla 24 Resultados de la Prueba 12

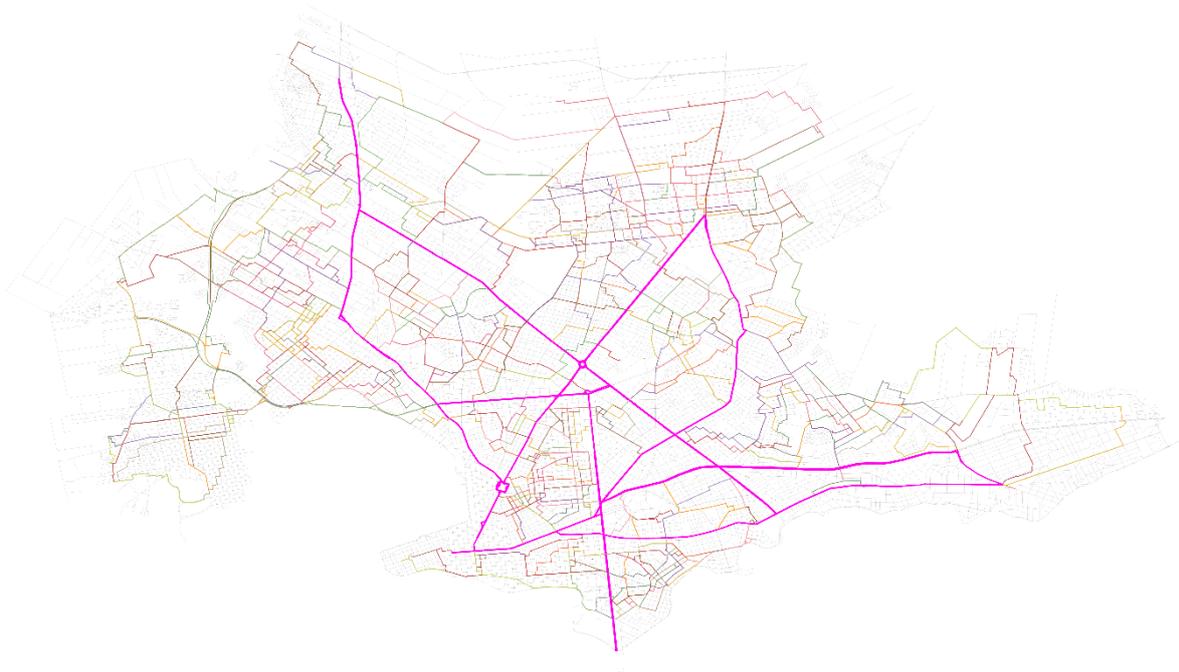


Ilustración 38 Visualización de recorridos generados de la Prueba 12

5.4.13 Costo Máximo: 30 km, Velocidad Relativa: 2x, Restricción Cíclica: 2,5 km

En la *Tabla 25* se muestran los resultados de la prueba (13) *Costo Máximo: 30 km, Velocidad Relativa: 2x, Restricción Cíclica: 2,5 km* y la *Ilustración 39* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	24.877.334
	Costo de Operadores	2.358
Recorridos	Recorridos generados	428
	Recorridos alimentadores	544
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	24.29%
	Cubrimiento Alimentador	75,71%
Clasificación de Viajes	Troncales	11.44%
	Alimentadores	13.28%
	Mixtos	75.29%
Flujo	Troncal	66.36%
	No troncal	33.64%
	Troncal (mixtos)	67.76%
	No troncal (mixtos)	32.24%

Tabla 25 Resultados de la Prueba 13

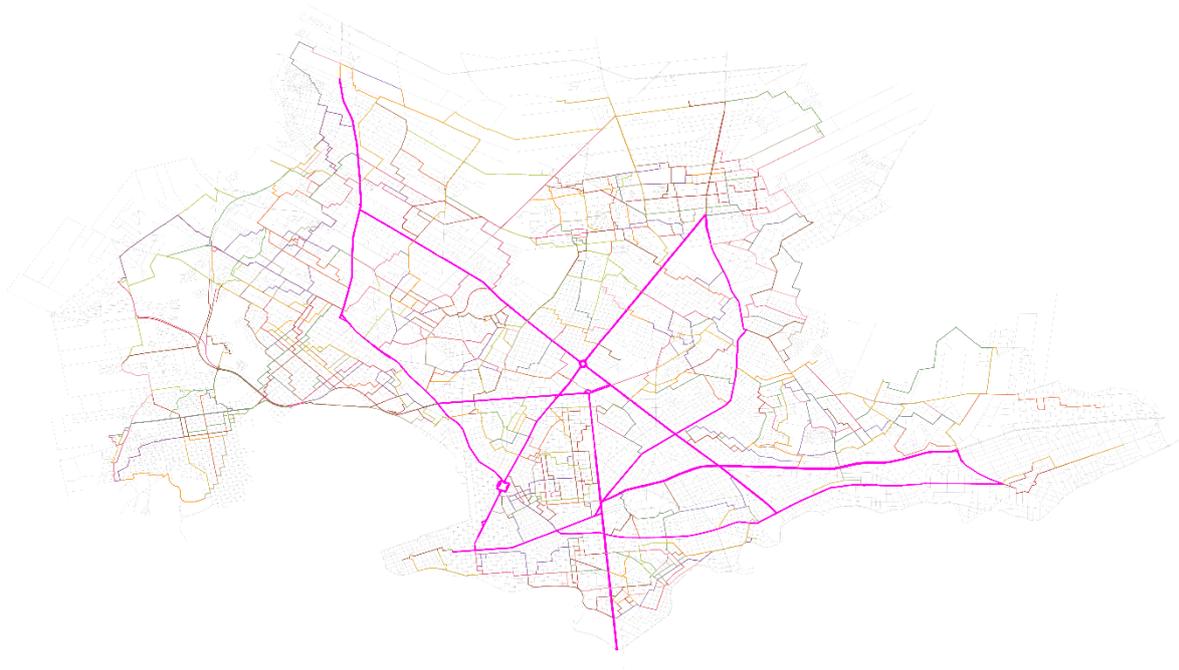


Ilustración 39 Visualización de recorridos generados de la Prueba 13

5.4.14 Costo Máximo: 20 km, Velocidad Relativa: 2,5x, Restricción Cíclica: 2,5 km

En la *Tabla 26* se muestran los resultados de la prueba (14) *Costo Máximo: 20 km, Velocidad Relativa: 2,5x, Restricción Cíclica: 2,5 km* y en la *Ilustración 40* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	22.291.972
	Costo de Operadores	2.220
Recorridos	Recorridos generados	473
	Recorridos alimentadores	519
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	25.00%
	Cubrimiento Alimentador	75.00%
Clasificación de Viajes	Troncales	11.85%
	Alimentadores	12.96%
	Mixtos	75.19%
Flujo	Troncal	68.27%
	No troncal	31.73%
	Troncal (mixtos)	69.65%
	No troncal (mixtos)	30.35%

Tabla 26 Resultados de la Prueba 14



Ilustración 40 Visualización de recorridos generados de la Prueba 14

5.4.15 Costo Máximo: 38 km, Velocidad Relativa: 2x

En la *Tabla 27* se muestran los resultados de la prueba (15) *Costo Máximo: 38 km, Velocidad Relativa: 2x* y la *Ilustración 41* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	24.874.528
	Costo de Operadores	2.509
Recorridos	Recorridos generados	372
	Recorridos alimentadores	572
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	23,50%
	Cubrimiento Alimentador	76,50%
Clasificación de Viajes	Troncales	11,48%
	Alimentadores	13,44%
	Mixtos	75,08%
Flujo	Troncal	66,31%
	No troncal	33,69%
	Troncal (mixtos)	67,74%
	No troncal (mixtos)	32,26%

Tabla 27 Resultados de la Prueba 15

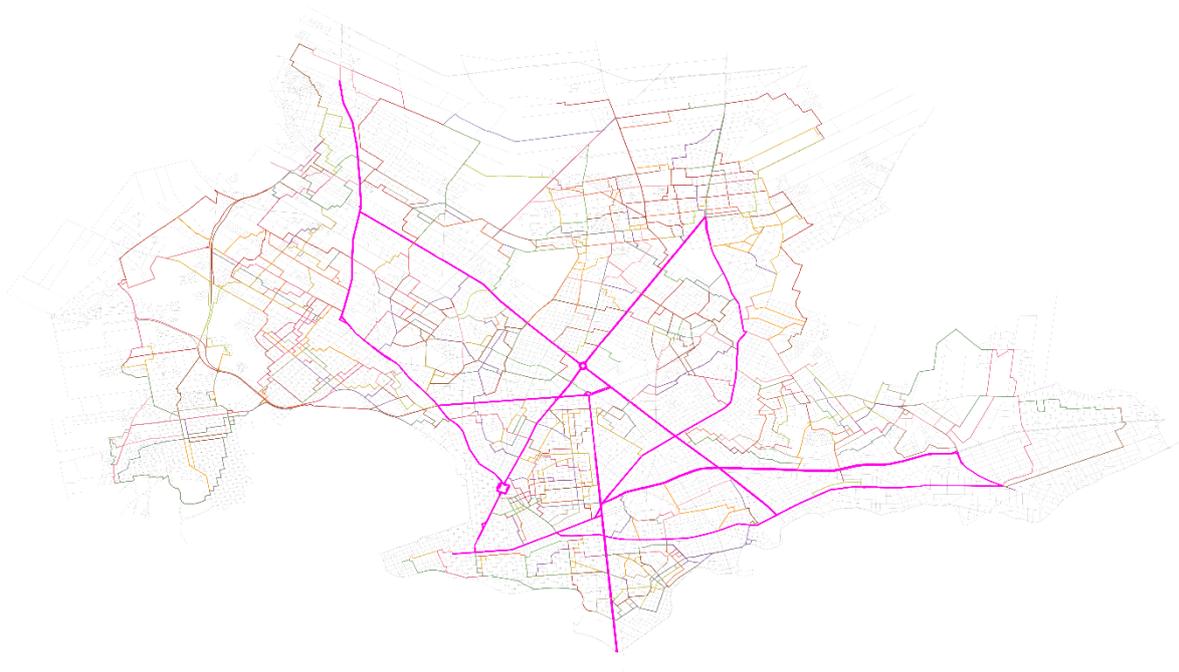


Ilustración 41 Visualización de recorridos generados de la Prueba 15

5.4.16 Costo Máximo: 20 km, Velocidad Relativa: 2,5x

En la *Tabla 28* se muestran los resultados de la prueba (16) Costo Máximo: 20 km, Velocidad Relativa: 2,5x y en la *Ilustración 42* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	22.323.638
	Costo de Operadores	2.106
Recorridos	Recorridos generados	419
	Recorridos alimentadores	494
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	25,09%
	Cubrimiento Alimentador	74,91%
Clasificación de Viajes	Troncales	11,85%
	Alimentadores	12,89%
	Mixtos	75,26%
Flujo	Troncal	68,26%
	No troncal	31,74%
	Troncal (mixtos)	69,64%
	No troncal (mixtos)	30,26%

Tabla 28 Resultados de la Prueba 16

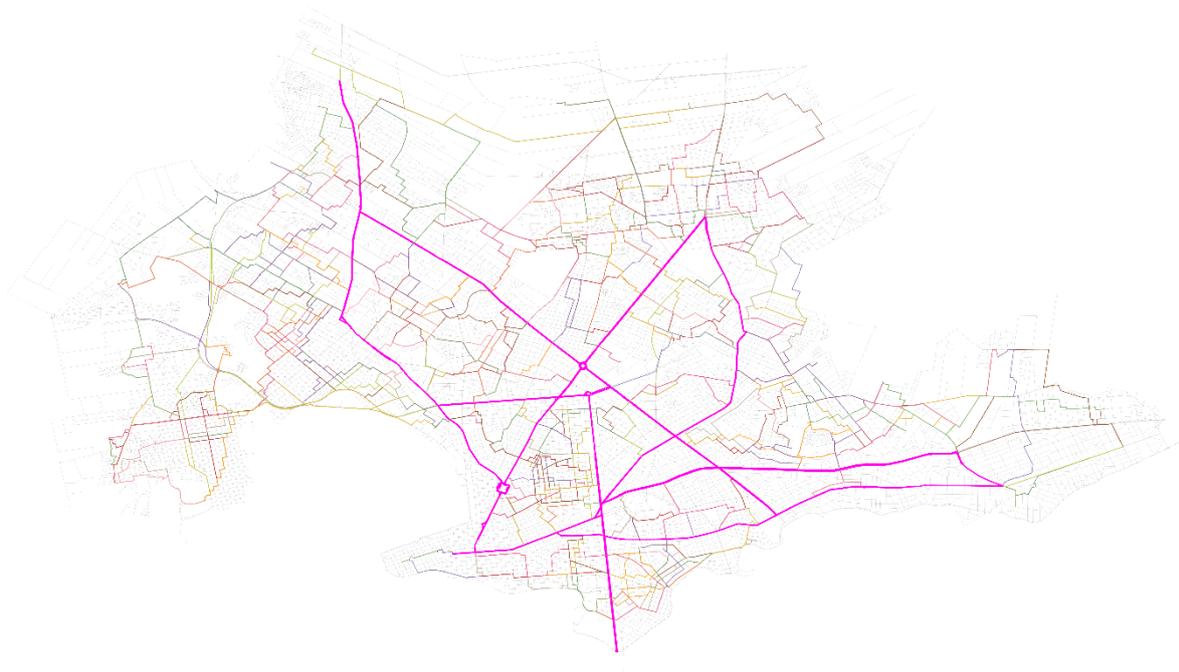


Ilustración 42 Visualización de recorridos generados de la Prueba 16

5.4.17 Costo Máximo: 30 km, Velocidad Relativa: 2,5x

En la *Tabla 29* se muestran los resultados de la prueba (17) *Costo Máximo: 30 km, Velocidad Relativa: 2,5x* y en la *Ilustración 43* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	22.299.597
	Costo de Operadores	2.194
Recorridos	Recorridos generados	351
	Recorridos alimentadores	504
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	25,42%
	Cubrimiento Alimentador	74,58%
Clasificación de Viajes	Troncales	11,85%
	Alimentadores	13,10%
	Mixtos	75,05%
Flujo	Troncal	68,28%
	No troncal	31,72%
	Troncal (mixtos)	69,72%
	No troncal (mixtos)	30,28%

Tabla 29 Resultados de la Prueba 17

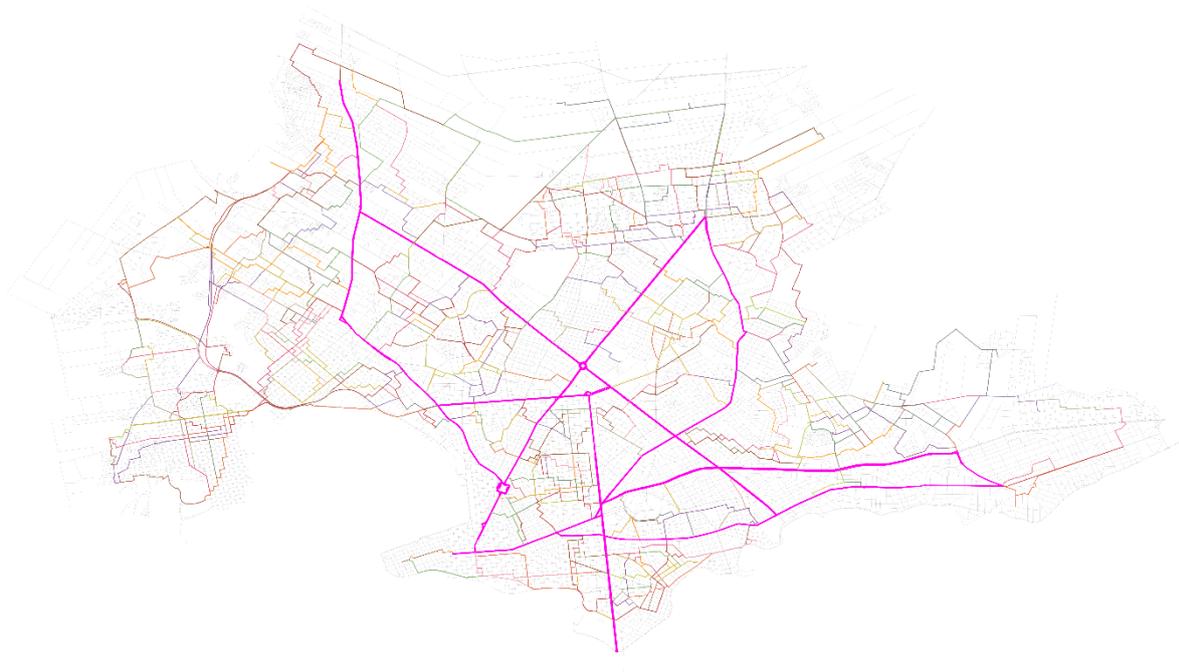


Ilustración 43 Visualización de recorridos generados de la Prueba 17

5.4.18 Costo Máximo: 38 km, Velocidad Relativa: 2,5x

En la *Tabla 30* se muestran los resultados de la prueba (18) *Costo Máximo: 38 km, Velocidad Relativa: 2,5x* y en la *Ilustración 44* los correspondientes recorridos generados.

Tipo de Métrica	Métrica	Resultado
Función Objetivo	Costo de Usuarios	22.299.597
	Costo de Operadores	2.194
Recorridos	Recorridos generados	351
	Recorridos alimentadores	504
Cubrimiento	Cubrimiento Troncal	25,42%
	Cubrimiento Alimentador	74,58%
Clasificación de Viajes	Troncales	11,85%
	Alimentadores	13,10%
	Mixtos	75,05%
Flujo	Troncal	68,28%
	No troncal	31,72%
	Troncal (mixtos)	69,72%
	No troncal (mixtos)	30,28%

Tabla 30 Resultados de la Prueba 18



Ilustración 44 Visualización de recorridos generados de la Prueba 18

5.4.19 Tabla de resultados

A continuación, se presenta la *Tabla 31* y la *Tabla 32* donde se unifican los resultados para el plan de pruebas definido en la *Sección 5.3*.

#	Prueba	Función Objetivo		Recorridos		Cubrimiento	
		Costo de Usuarios	Costo de Operadores	Recorridos Generados	Recorridos Alimentadores	Cubrimiento Troncal	Cubrimiento Alimentador
1	Situación Actual	32.969.637	7.055	314	314	0%	100%
2	Red Troncal sin Beneficio de Velocidad	34.885.501	4.167	294	838	17,75%	82,25%
3	Línea base	28.787.684	2.912	382	627	21,26%	78,74%
4	Velocidad Relativa: 2x	24.874.528	2.509	372	572	23,50%	76,50%
5	Velocidad Relativa: 2,5x	22.299.597	2.194	351	504	25,42%	74,58%
6	Velocidad Relativa: 5x	16.911.108	1.724	550	419	27,71%	72,29%
7	Costo Máximo: 38 km/vel _{rel}	28.807.803	2.691	269	560	21,75%	78,25%
8	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel}	28.786.138	2.902	490	642	21,07%	78,93%
9	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel}	28.801.877	2.811	359	612	21,50%	78,50%
10	Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	28.801.217	2.794	338	607	21,65%	78,35%
11	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x	24.872.867	2.474	382	545	23,39%	76,61%
12	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x	24.874.528	2.509	372	572	23,5%	76,5%
13	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x, Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	24.877.334	2.358	428	544	24,29%	75,71%
14	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x, Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	22.291.972	2.220	473	519	25,00%	75,00%
15	Costo Máximo: 38 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x	24.874.528	2.509	372	572	23,50%	76,50%
16	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x	22.323.638	2.106	419	494	25,09%	74,91%
17	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x	22.299.597	2.194	351	504	25,42%	74,58%
18	Costo Máximo: 38 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x	22.299.597	2.194	351	504	25,42%	74,58%

Tabla 31 Resultados de todas las pruebas (1)

#	Prueba	Clasificación de Viajes			Flujo			
		Troncales	Alimentadores	Mixtos	Troncal	No Troncal	Troncal (Mixtos)	No Troncal (Mixtos)
1	Situación Actual	0%	100%	0%	0%	100%	0%	0%
2	Red Troncal sin Beneficio de Velocidad	8,06%	20,62%	71,33%	39,02%	60,98%	40,98%	59,02%
3	Línea base	10,66%	15,59%	73,75%	61,16%	38,84%	63,30%	36,70%
4	Velocidad Relativa: 2x	11,48%	13,44%	75,08%	66,31%	33,69%	67,74%	32,26%
5	Velocidad Relativa: 2,5x	11,85%	13,10%	75,05%	68,28%	31,72%	69,72%	30,28%
6	Velocidad Relativa: 5x	11,85%	11,69%	76,46%	70,63%	29,37%	71,79%	28,21%
7	Costo Máximo: 38 km/vel _{rel}	10,65%	15,50%	73,85%	61,36%	38,64%	63,60%	36,40%
8	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel}	10,66%	15,57%	73,77%	61,17%	38,83%	63,35%	36,65%
9	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel}	10,66%	15,20%	74,14%	61,35%	38,65%	63,16%	36,84%
10	Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	10,66%	15,51%	73,83%	61,17%	38,83%	63,38%	36,62%
11	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x	11,44%	13,53%	75,03%	66,21%	33,79%	67,71%	32,29%
12	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x	11,48%	13,44%	75,08%	66,31%	33,69%	67,74%	32,26%
13	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x, Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	11,44%	13,28%	75,29%	66,36%	33,64%	67,76%	32,24%
14	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x, Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	11,85%	12,96%	75,19%	68,27%	31,73%	69,65%	30,35%
15	Costo Máximo: 38 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2x	11,48%	13,44%	75,08%	66,31%	33,69%	67,74%	32,26%
16	Costo Máximo: 20 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x	11,85%	12,89%	75,26%	68,26%	31,74%	69,64%	30,26%
17	Costo Máximo: 30 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x	11,85%	13,10%	75,05%	68,28%	31,72%	69,72%	30,28%
18	Costo Máximo: 38 km/vel _{rel} , Velocidad Relativa: 2,5x	11,85%	13,10%	75,05%	68,28%	31,72%	69,72%	30,28%

Tabla 32 Resultados de todas las pruebas (2)

5.5 Análisis de resultados

En esta sección se realiza un conjunto de análisis en base los resultados obtenidos para las pruebas definidas en la *Sección 5.4*. Los resultados para las distintas métricas son analizados a nivel de los factores definidos como parámetros de configuración del algoritmo: *velocidad relativa de la red troncal* (vel_{rel}), *costo máximo permitido por recorrido* (CM) y *restricción cíclica* (RC). Se busca analizar la incidencia de cada uno de los factores en los resultados, así como también el efecto de distintas combinaciones de los mismos.

5.5.1 Incidencia del factor velocidad relativa

Algunas de las interrogantes que se plantean al inicio de este trabajo son: ¿cuál es la incidencia de la velocidad relativa de la red troncal en la definición de la red alimentadora? ¿qué impacto tiene la velocidad troncal en los costos operativos de los recorridos alimentadores?

Con el propósito de dar respuesta a estas interrogantes y obtener conclusiones relacionadas con el efecto de la velocidad, se realiza un análisis al conjunto de resultados compuesto por las pruebas del 1 al 6 (*Tabla 12*). Salvo para la prueba (1) *situación actual* (donde la red troncal no está definida), la única variante entre las pruebas es vel_{rel} , de forma tal que los resultados puedan ser comparables entre sí.

Quizás uno de los efectos más importantes que se observa es en las métricas relacionadas con la *Función Objetivo*, más precisamente en el *Costo de Usuario*.

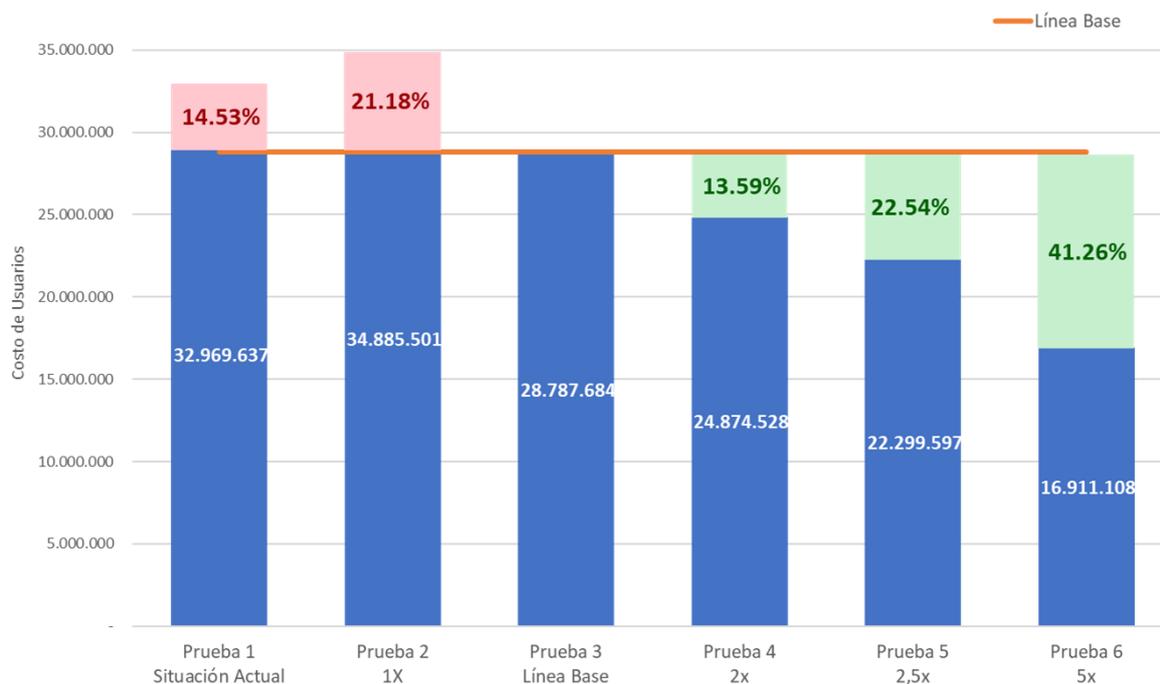


Ilustración 45 Costos de usuario, incidencia del factor velocidad relativa

En la *Ilustración 45* se muestra el resultado de la métrica *Costo de Usuario* correspondiente a las pruebas del 1 al 6. Para las pruebas (1) *Situación actual* y (2) *Red troncal sin beneficio de velocidad* el *Costo de Usuario* son un 14,53% y 21,18% mayores respectivamente en comparación con la prueba

(3) *Línea Base*, cuyo valor de *Costo de Usuario* es de 28.787.684. Estos resultados son coherentes con el hecho de que para la prueba (1) ni siquiera existe la red troncal como tal y por ende se le da la libertad al algoritmo de generar otros recorridos (no restringidos a la existencia de recorridos troncales), y en (2) no hay un beneficio de velocidad para la red troncal, por lo que el uso de la misma no implica mejoras en tiempo de viaje, haciendo que el costo de usuario total acumulado sea mayor que el de *Línea Base*.

Un resultado interesante que involucra las pruebas (1) y (2), es que la prueba (2) tiene un costo de usuarios mayor pese a tener implementado una red de corredores troncales. Esto se explica debido a las restricciones de conexión a la red troncal y sus paradas espaciadas, y además que no existe un beneficio de velocidad con respecto a la red alimentadora. Esto implica que ***una red troncal, independientemente del medio de transporte que opere sobre la misma, es beneficiosa en términos de costo de usuarios, solamente si se puede asegurar una mayor velocidad relativa que la red alimentadora.***

Por otro lado, para las pruebas (4) *Velocidad relativa troncal: 2x veces más rápida*, (5) *Velocidad relativa troncal: 2,5x veces más rápida* y (6) *Velocidad relativa troncal: 5x veces más rápida*, los datos muestran una disminución en el *Costo de Usuario* con respecto a la prueba (3) *Línea Base*. A medida que se aumenta vel_{rel} , se obtiene un menor *Costo de Usuario*. Para la prueba (4), cuando la red troncal es el doble de rápida que la red alimentadora se observa una disminución del 13,59% en el *Costo de Usuario*. Para la prueba (5), cuando la red troncal es 2,5 veces más rápida que la red alimentadora la disminución es del 22,54% en *Costo de Usuario*. En la prueba (6), cuando la red troncal es cinco veces más rápida que la red alimentadora la disminución es del 41,26% en *Costo de Usuario* con respecto a la *Línea Base*.

Estos datos, que relacionan el factor velocidad relativa de la red troncal con la métrica de *Costo de Usuario*, pueden ser de ayuda en la toma de decisiones estratégicas, ya que pueden servir como dato de entrada para responder cuestiones como: ¿Cuánto debería aumentar la velocidad del medio de transporte de una red troncal si se quisiera mejorar en un cierto porcentaje el tiempo de viaje total?, o bien, analizar la viabilidad de una posible inversión que implica un cambio de tecnología que modifica la velocidad de la red troncal y el impacto de la misma en el costo para los usuarios. A su vez, los resultados confirman la hipótesis de que, ***si se tiene un Costo de Usuario compuesto mayoritariamente por el tiempo de viaje a bordo, una red troncal con mayor velocidad impacta positivamente en la métrica Costo de Usuario, es decir, se tendrá un valor menor.*** Esto parece razonable, pues en definitiva, los usuarios viajarán más rápido (en caso de utilizar la red troncal), y por lo tanto completarán sus viajes en menos tiempo.

Cambios en vel_{rel} , también inciden en las métricas de *Costo de Operación* y de *Cubrimiento Troncal*. Como se observa en la *Ilustración 46*, a medida que se aumenta vel_{rel} , se mejora el porcentaje de cubrimiento de la red troncal, esto indica que a ***mayor velocidad troncal hay una mayor prevalencia de la red troncal en la red de recorridos totales.*** Esto está directamente vinculado al descenso en el *Costo de Operación*, pues cabe recordar que ***la red troncal no reporta costos operativos (el término refiere únicamente a los costos de operación de la red alimentadora)***, por lo que un mayor cubrimiento troncal es beneficioso para los operadores.

Otro efecto de la velocidad relativa de la red troncal es sobre la métrica porcentaje de *Flujo Troncal*. El resultado de dicha métrica para la prueba (3) indica que el *Flujo Troncal* es de 61,16% del total (*Tabla 15*). Mientras que, para las pruebas (4), (5) y (6) el *Flujo Troncal* es de 66,31% (*Tabla 16*), 68,28% (*Tabla 17*) y 70,63% (*Tabla 18*) respectivamente. Es decir que ***un mayor valor de vel_{rel} implica un mayor flujo de la red troncal.*** Una red troncal más rápida es “más atractiva”, pues el algoritmo decide

generar recorridos que hagan uso de la misma dado el beneficio de la velocidad, haciendo que el flujo por la red troncal sea mayor.

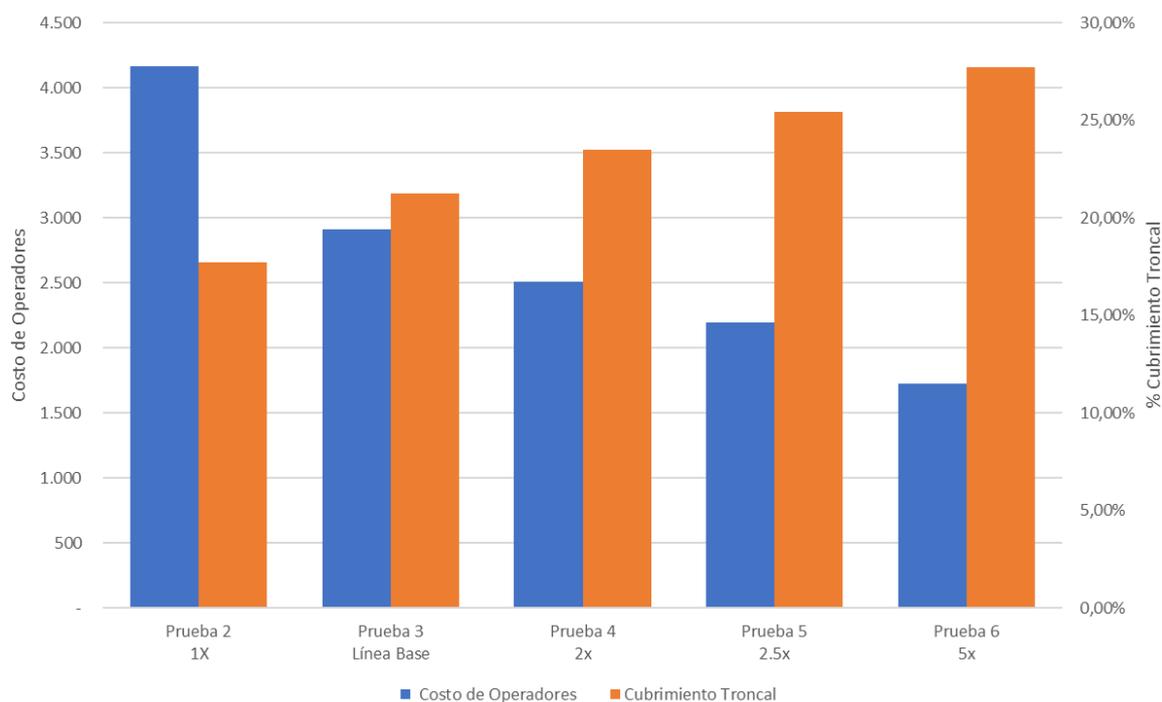


Ilustración 46 Costo de operadores y cubrimiento troncal, incidencia del factor velocidad relativa

5.5.2 Incidencia del factor costo máximo

Con el propósito de analizar el impacto del factor de costo máximo por recorrido, se observa el conjunto de resultados compuesto por las pruebas (3), (7), (8) y (9), donde la única variante entre las pruebas es el factor CM , de forma tal que los resultados puedan ser comparables entre sí.

Uno de los efectos más notables de aumentar el costo máximo es la disminución en la cantidad de recorridos necesarios para satisfacer la demanda.

En la Ilustración 47 se muestra el resultado de la métrica *Cantidad de Recorridos Alimentadores* correspondiente a las pruebas seleccionadas. Una disminución (aumento) de 5 km/vel_{rel} respecto a la línea base da como resultado un aumento (disminución) de un 2,39% en la cantidad de recorridos alimentadores para las pruebas (8) y (9) respectivamente. A su vez, aumentar CM en 18 km/vel_{rel} respecto a la *Línea Base* resulta en una disminución del 10,69% de la cantidad de recorridos alimentadores necesarios.

Esta disminución en la cantidad de recorridos trae asociada una reducción de *Costos de Operación*, donde la mejora más significativa se da al comparar la línea base de costo 2.912 (Tabla 15) y la prueba (7) de costo 2.691, logrando una reducción de más del 7%.

Como podría esperarse, el efecto sobre el *Costo de Usuario* es el inverso. En la Ilustración 48 se muestra el resultado de la métrica *Costo de Usuario*.

Si bien se confirma el supuesto de que, a mayor *CM*, mayor *Costo de Usuario*, lo que resulta interesante es que para la dupla seleccionada (prueba (3) y prueba (7)), pasar de 25 km/vel_{rel} a 38 km/vel_{rel} resultó en una mejora significativa para el *Costo de Operación* (una reducción del 7,59%) a costa de un aumento del 0,07% de *Costo de Usuario*, el cual podría considerarse despreciable en comparación a la mejora del *Costo de Operación*. Esto es producto de la generación de una menor cantidad recorridos alimentadores, pero más largos (debido al aumento de *CM*), lo que, en general, es mejor para los operadores y peor para los usuarios.



Ilustración 47 Recorridos alimentadores, incidencia del factor de costo máximo

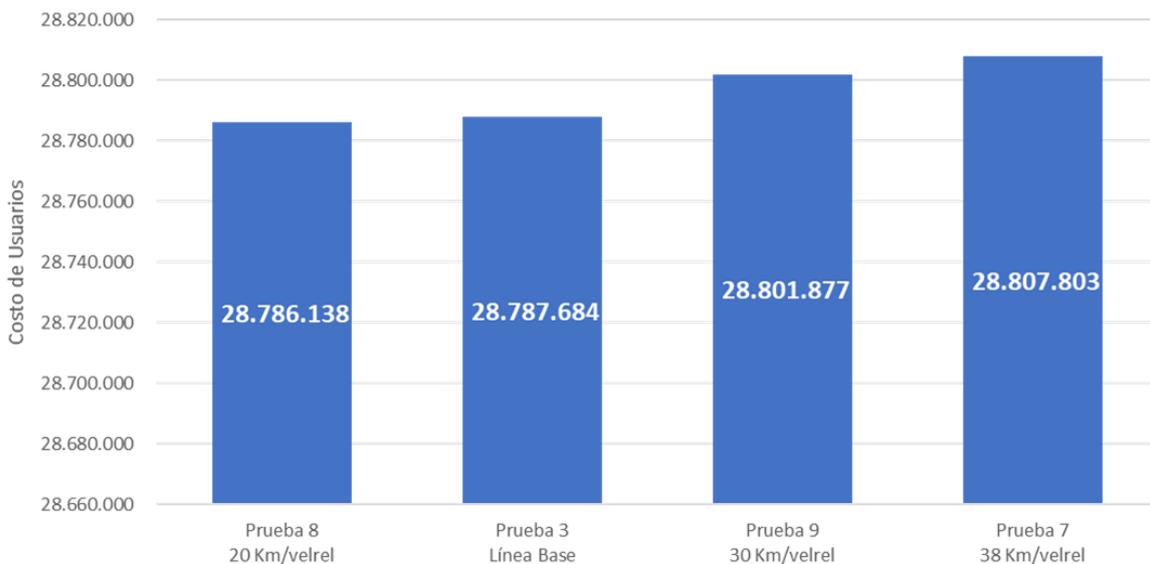


Ilustración 48 Costo de usuario, incidencia del factor de costo máximo

Luego de validar la hipótesis de que, a mayor valor de CM , menor cantidad de recorridos, podría ser de interés evaluar el impacto que esto provoca en el modo en que los usuarios hacen uso del sistema de transporte. Es posible realizar este análisis gracias a las métricas de *Clasificación de Viajes* (Sección 5.2.4), con las que se puede visualizar las distintas modalidades en las cuales un usuario puede interactuar con el sistema de transporte para satisfacer su necesidad de traslado.

En la *Ilustración 49* se muestra el resultado de las métricas de *Clasificación de Viajes* correspondiente a las pruebas seleccionadas. En la misma se puede apreciar que pese a haber una reducción en la cantidad de recorridos (tal como se describió anteriormente), se mantienen los modos en que los usuarios hacen uso de la red. Si bien se identifican pequeñas variaciones entre las pruebas, se puede

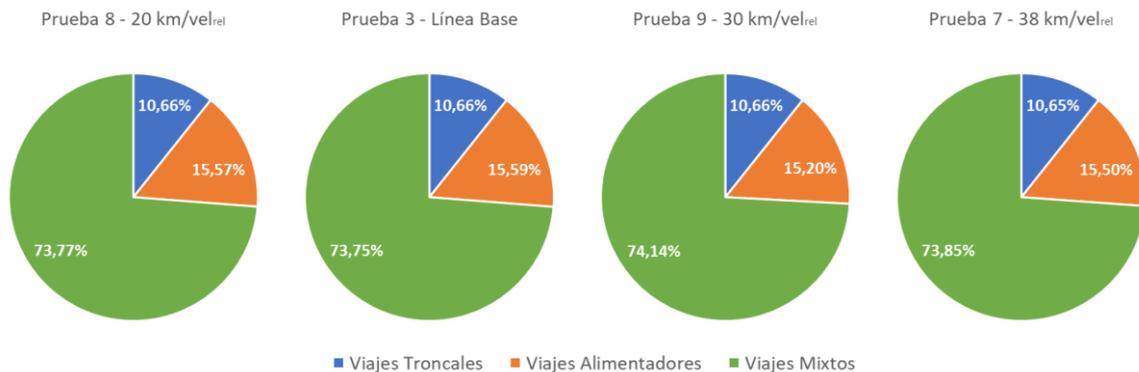


Ilustración 49 Métricas de clasificación de viajes, incidencia del factor de costo máximo

ver que la distribución de clasificación de viajes mantiene casi las mismas proporciones a lo largo de todas las pruebas.

La determinación de CM es una decisión de gran importancia, ya que la misma pareciera afectar de manera opuesta al Costo de Usuario y al Costo de Operación. **Disminuir CM , se traduce en menor costo de viaje para los usuarios (en este trabajo, menor tiempo de viaje), lo cual se logra mediante la generación recorridos de menor distancia (es decir, “más directos”), que a su vez resulta en una mayor cantidad de recorridos, aumentando así el Costo de Operación.** Por el contrario, a mayor CM , se admite una mayor extensión para los recorridos, permitiendo mayor inserción de nodos, lo que resulta en un menor Costo de Operadores producto de contar con una menor cantidad de recorridos, consecuentemente aumentando el Costo de Usuarios. Un detalle no menor que se debe tener en cuenta es que aumentar este factor no conlleva un costo extra de inversión en la infraestructura asociado, como sí lo puede haber en caso de querer aumentar vel_{rel} el cual posiblemente implique la implementación de una red posiblemente más cara.

A diferencia de la influencia de vel_{rel} , que representa una característica operacional del modo de operación de la red troncal, donde se observan desplazamientos de la demanda entre las redes alimentadoras y troncal, cuando cambia CM , que representa una decisión de diseño que regula la relación de la calidad de las soluciones para usuarios y operadores, los usuarios no modifican la elección del tipo de red, sino que experimentan cambios en la percepción del nivel de servicio.

5.5.3 Incidencia del factor restricción cíclica

En la *Tabla 33* Comparación de pruebas (3) y (10) se presenta una selección de valores de métricas para comparar los resultados de las pruebas (3) *Línea Base* y (10) *Restricción Cíclica: 2,5km/vel_{rel}*, con

el objetivo de visualizar cómo con un pequeño cambio en RC se obtienen ciertas variaciones en dichas métricas.

#	Prueba	Costo de Usuarios (km/vel _{rel})	Costo de Operadores (km/vel _{rel})	# Recorridos Alimentadores
3	Línea base	28.787.684	2.912	627
10	Restricción Cíclica: 2,5 km/vel _{rel}	28.801.217	2.794	607

Tabla 33 Comparación de pruebas (3) y (10)

Básicamente la diferencia entre las pruebas (3) y (10), es que la configuración del factor RC en la prueba (3) es de 1 km mientras que en (10) pasa a ser 2,5 km/vel_{rel}. Como se observa en la tabla anterior, con ese cambio, se obtiene una reducción del 4,05% en el *Costo de Operación* a cambio de un aumento de un 0,05% en el *Costo de Usuario*. Mientras que, en la métrica de *Cantidad de Recorridos Alimentadores*, también se obtienen cambios, pues los recorridos alimentadores se reducen un 3,19%. Para este caso, se confirma la hipótesis de que la variación en el factor RC , que a priori no tiene un costo directo (a diferencia del cambio de velocidad relativa de la red troncal), tiene un impacto significativo en las métricas de función objetivo y de recorridos, mostrando que es un parámetro de configuración importante para el algoritmo. **Este parámetro de diseño de la red alimentadora, tiene un efecto similar al del factor CM , pues en cierta forma a través de ellos es posible regular la calidad de la solución en términos de costo de usuarios y operadores.**

5.5.4 Incidencia de Múltiples factores

Teniendo en cuenta que es posible combinar variaciones de los distintos factores, resulta interesante ver cómo dichas combinaciones afectan los resultados de las principales métricas.

En una primera instancia, se definen dos conjuntos de pruebas para los cuales se analizarán las métricas. El criterio para conformar dichos conjuntos es, dada una configuración de vel_{rel} , variar la configuración del factor CM :

- *Conjunto 1:* Fijado el factor de velocidad relativa en 2, se varía el factor CM para las distintas configuraciones (20 km/vel_{rel}, 25 km/vel_{rel}, 30 km/vel_{rel} y 38 km/vel_{rel}). Por lo que este conjunto queda conformado por:
 - Prueba (4): *Velocidad relativa troncal 2x veces más rápida, 25 km/vel_{rel} Costo Máximo.*
 - Prueba (11): *Velocidad relativa troncal 2x veces más rápida, 20 km/vel_{rel} Costo Máximo.*
 - Prueba (12): *Velocidad relativa troncal 2x veces más rápida, 30 km/vel_{rel} Costo Máximo.*
 - Prueba (15): *Velocidad relativa troncal 2x veces más rápida, 38 km/vel_{rel} Costo Máximo.*
- *Conjunto 2:* Fijado el factor de velocidad relativa en 2,5, se varía el factor CM para las distintas configuraciones (20km/vel_{rel}, 25km/vel_{rel}, 30km/vel_{rel} y 38km/vel_{rel}). Por lo que este conjunto queda conformado por:

- Prueba (5): Velocidad relativa troncal 2,5x veces más rápida, 25 km/vel_{rel} Costo Máximo.
- Prueba (16): Velocidad relativa troncal 2,5x veces más rápida, 20 km/vel_{rel} Costo Máximo.
- Prueba (17): Velocidad relativa troncal 2,5x veces más rápida, 30 km/vel_{rel} Costo Máximo.
- Prueba (18): Velocidad relativa troncal 2,5x veces más rápida, 38 km/vel_{rel} Costo Máximo.

En la *Ilustración 50* y la *Ilustración 51* se muestran los resultados para la métrica *Costo de Operación* para *Conjunto 1* y *Conjunto 2* respectivamente, ya que es la métrica para la cual se obtiene la variación de resultados más relevante. Dichas gráficas indican que la configuración de *CM* que logra mejor costo operativo para ambos conjuntos es la de 20 km/vel_{rel}.

Además, los datos muestran que las variantes de *CM* de 30 km/vel_{rel} y 38 km/vel_{rel} no producen ningún cambio en cuanto *Costo de Operación* con respecto a 25 km/vel_{rel} en ambos conjuntos. Este comportamiento también se observa para el resto de las métricas, pues como se puede ver en las tablas de resultados en la *Sección 5.4* las pruebas (4), (12) y (15) coinciden entre sí, mientras que las pruebas (5), (17) y (18) también coinciden entre sí.

A raíz de estos resultados, se puede decir que tanto para un valor de *vel_{rel}* de 2 como de 2,5, si se mantienen fijos los factores de *vel_{rel}* y *RC*, existe un cierto valor de *CM* (ubicado entre 20 km/vel_{rel} y 25 km/vel_{rel}) a partir del cual el algoritmo obtiene el mismo conjunto de recorridos solución. Dicho valor de *CM* depende directamente del tamaño de la red, de la disposición espacial de los pares origen-destino (es decir, disposición de la demanda dentro de la ciudad) y de la velocidad relativa de la red troncal. Por otra parte, no se puede descartar la posibilidad de que exista otro valor de *CM*,

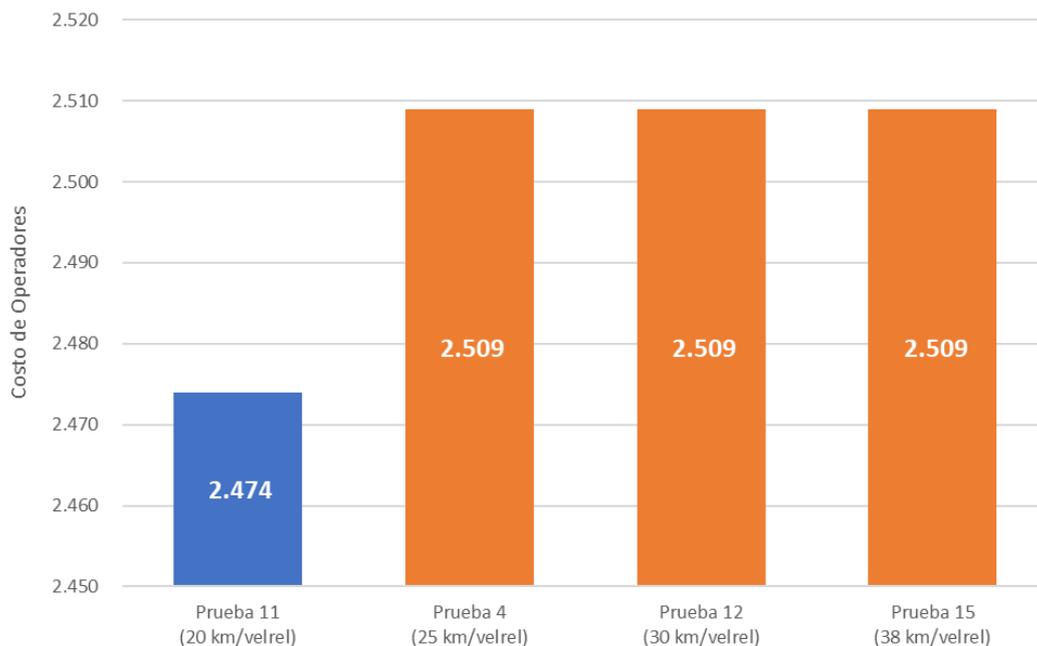


Ilustración 50 Costo de operadores, conjunto de pruebas 1 (2x), múltiples factores

eventualmente mucho mayor, para el cual la igualdad de soluciones obtenidas por el algoritmo ya no se cumpla.

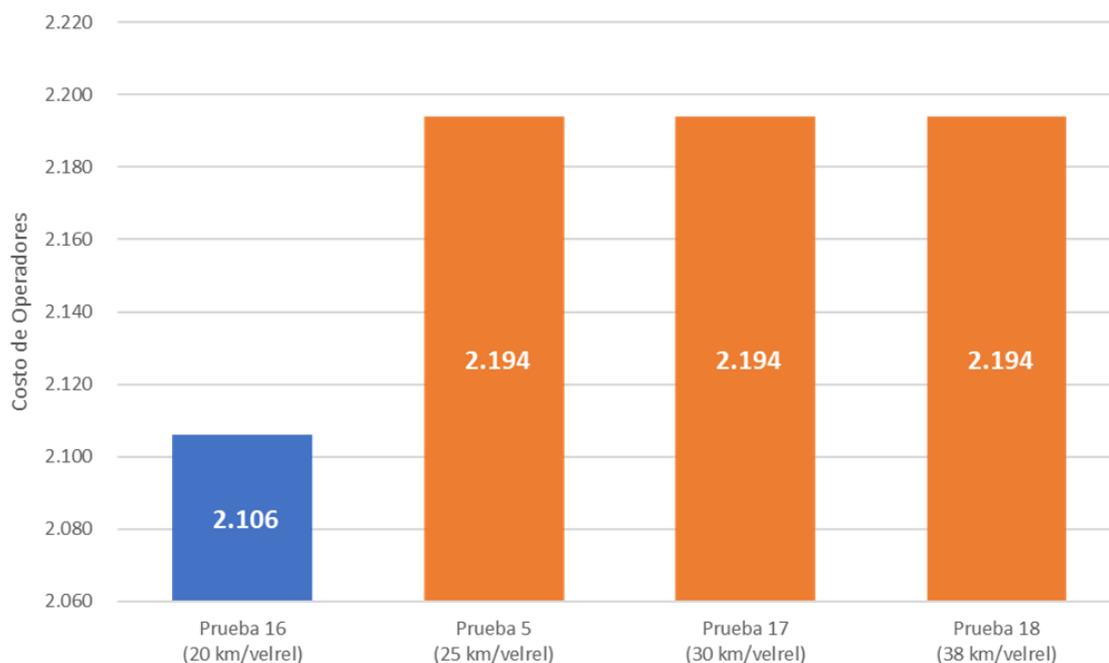


Ilustración 51 Costo de Operadores, conjunto de pruebas 1 (2,5x), múltiples factores

Si se considera el conjunto de pruebas a las que se le modifican al menos 2 factores y en particular aquellas que su valor de vel_{rel} es de 2 o 2,5, el mismo puede ser clasificado en clases de equivalencia. La característica que identifica a los elementos de una clase, es que los mismos presentan valores cercanos para las métricas de *Costo de Usuario* y *Costo de Operación*. El conjunto de pruebas seleccionado se puede clasificar en dos clases de equivalencia: la clase de las pruebas con valor de vel_{rel} igual a 2 y la clase de las pruebas con valor de vel_{rel} igual a 2,5. Esto parece indicar que el **factor de velocidad relativa tiene mayor incidencia en las métricas de Función Objetivo en comparación con el resto de los factores**, como se puede apreciar en la Ilustración 52 y la Ilustración 54.

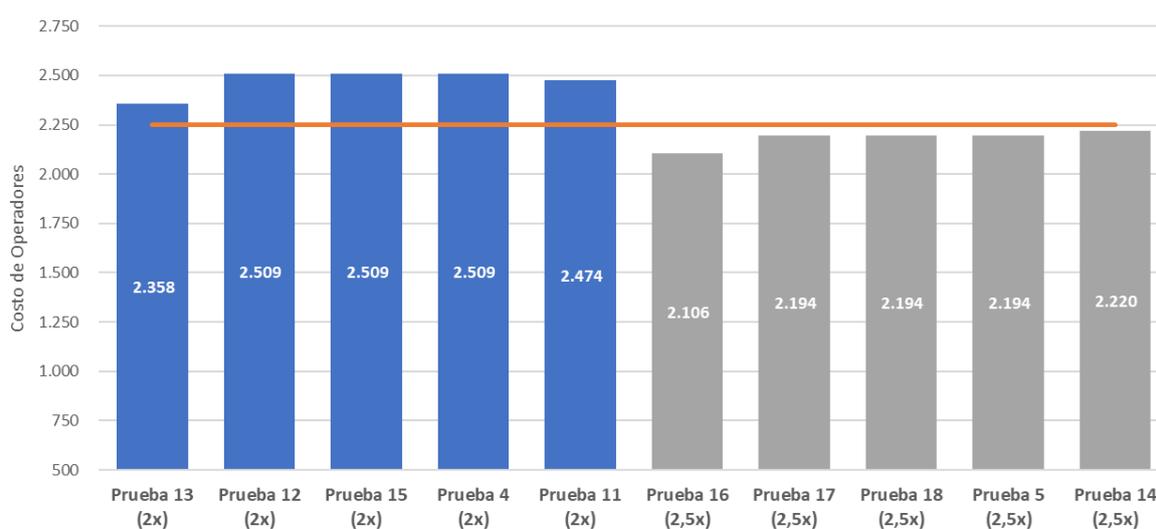


Ilustración 52 Costo de Operadores, clases de equivalencia 2x y 2,5x

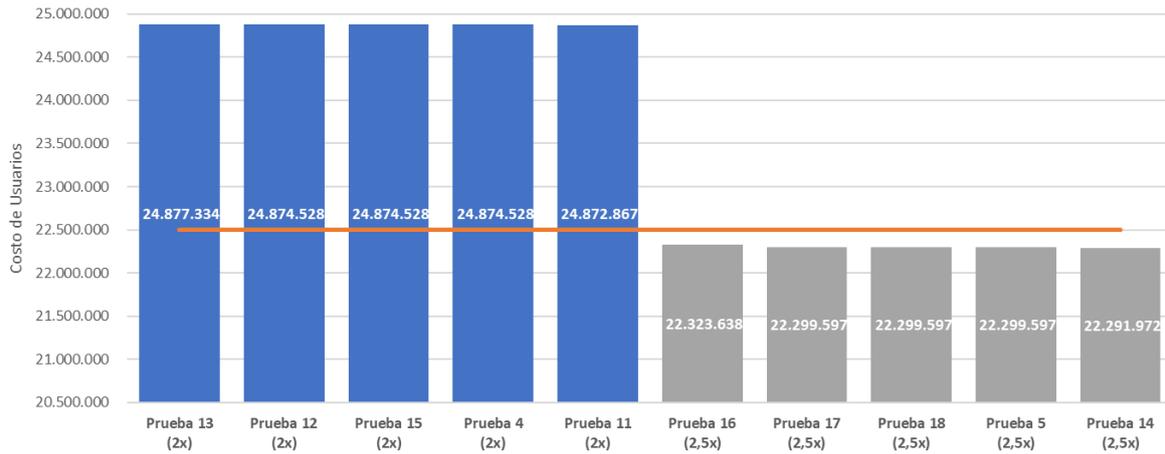


Ilustración 54 Costo de Usuarios, clases de equivalencia 2x y 2,5x

Es de interés verificar si el comportamiento identificado anteriormente puede ser extendido a aquellas pruebas cuyo valor de vel_{rel} es de 1,5 o 5. Es entonces que, haciendo un análisis similar, se identificaron cuatro clases de equivalencia que cumplen las características anteriormente descritas. En la Ilustración 53 y la Ilustración 56 se observa cómo quedan agrupados los resultados de las métricas Costo de Operación y Costo de Usuario respectivamente, para cada una de las clases de equivalencia. De esta manera, **se puede afirmar que el factor vel_{rel} es determinante en el comportamiento de las soluciones obtenidas con respecto a las métricas de Función Objetivo.**

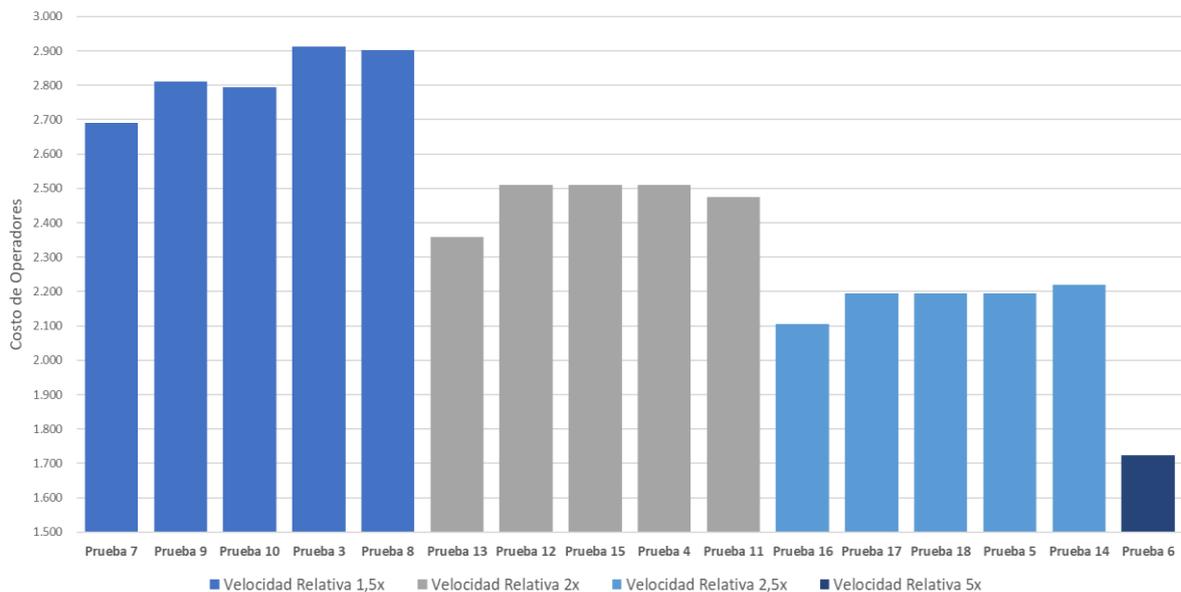


Ilustración 53 Costo de Operadores, clases de equivalencia

Adicionalmente, la clasificación en clases de equivalencia por vel_{rel} también se puede replicar para las métricas de Cubrimiento (Ilustración 55), Clasificación de viajes (Ilustración 57, Ilustración 58) y Flujo (Ilustración 59, Ilustración 60).

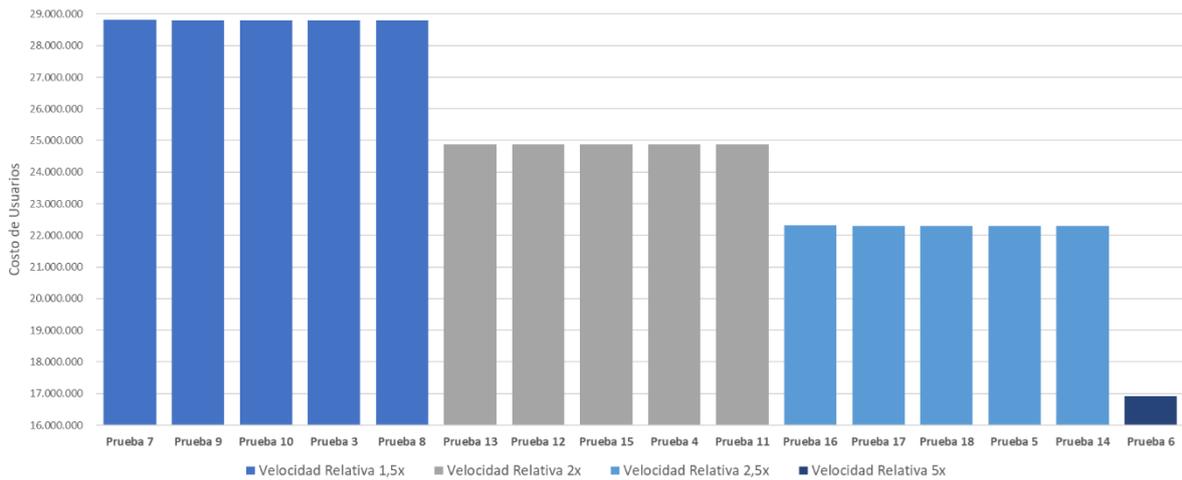


Ilustración 56 Costo de Usuarios, clases de equivalencia

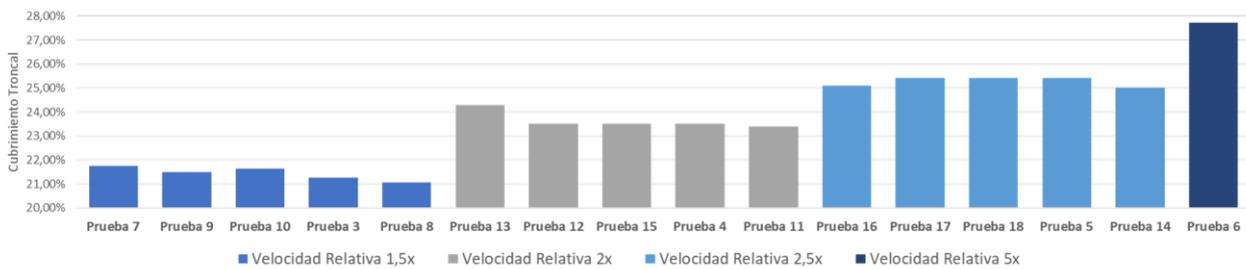


Ilustración 55 Cubrimiento Troncal, clases de equivalencia

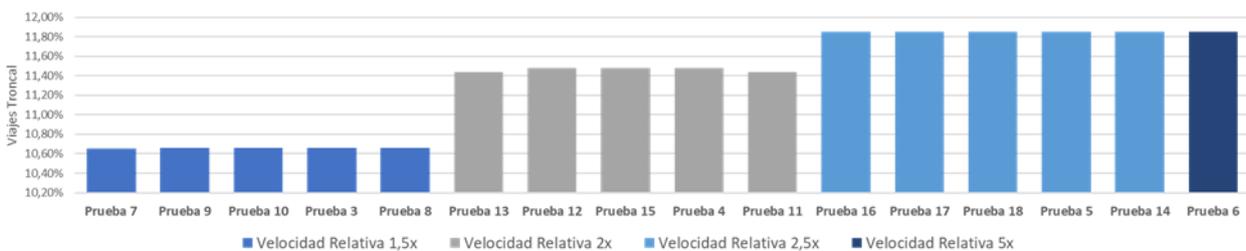


Ilustración 57 Viajes Troncal, clases de equivalencia

La *Ilustración 57* muestra un resultado interesante para la métrica *Viajes Troncales*, concretamente muestra que **a partir de $vel_{rel} 2,5$, sin importar cuánto aumente vel_{rel} , no es posible obtener mejoras en el porcentaje de viajes exclusivamente troncales**. Esto se debe a que toda la demanda que puede ser satisfecha utilizando exclusivamente la red troncal ya se encuentra totalmente cubierta. Tanto el valor máximo de la métrica *Viajes Troncales*, como el valor de vel_{rel} a partir del cual se alcanza el máximo porcentaje de viajes troncales dependen directamente de la disposición espacial de los pares origen-destino y de la red troncal.

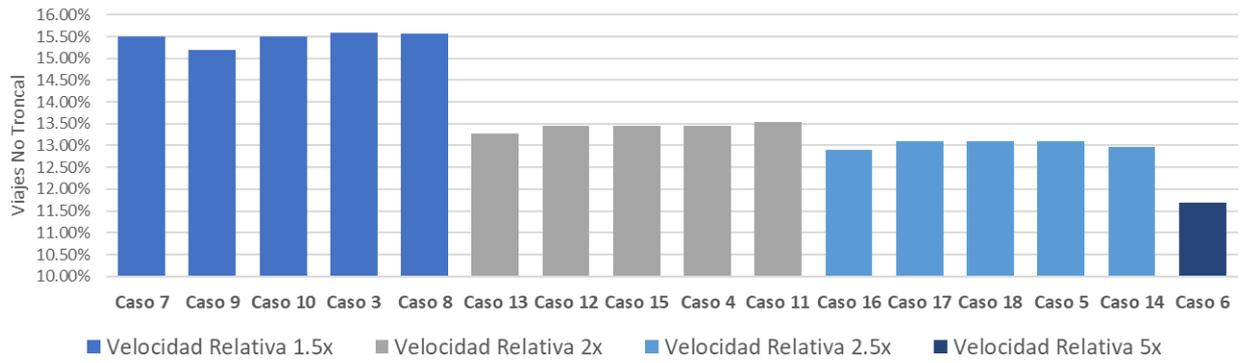


Ilustración 58 Viajes No Troncal, clases de equivalencia

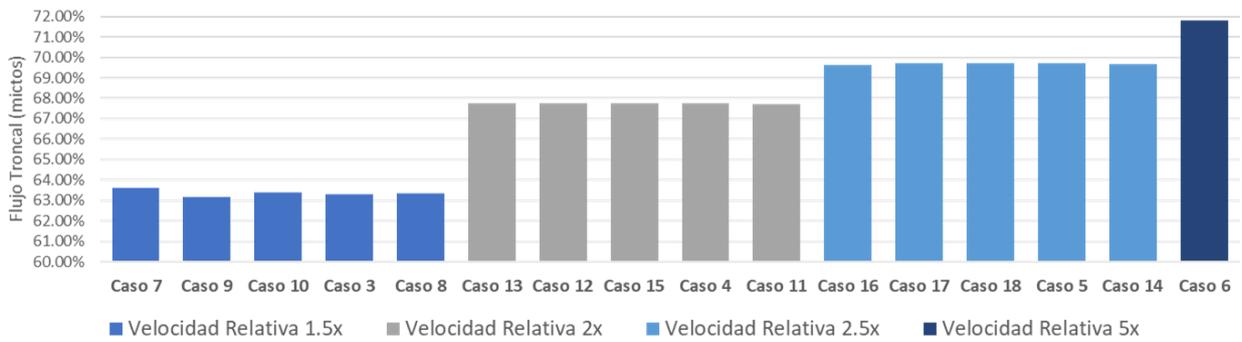


Ilustración 59 Flujo Troncal, clases de equivalencia

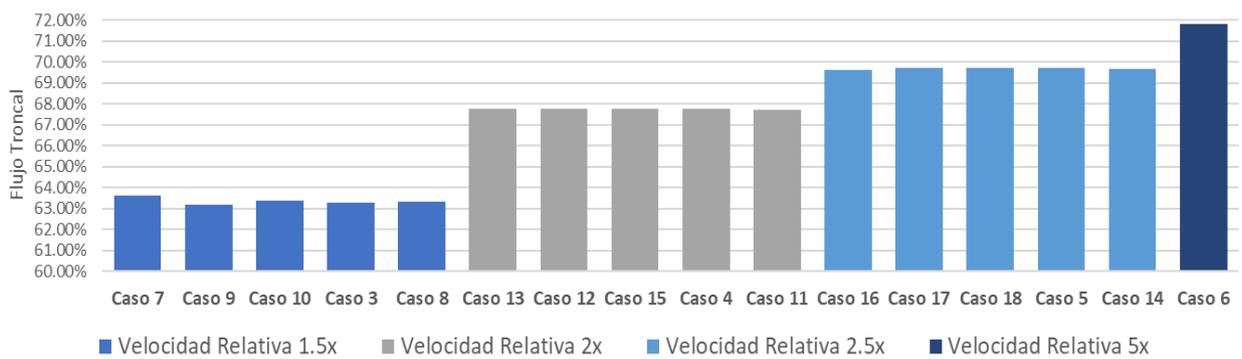


Ilustración 60 Flujo Troncal (mixtos), clases de equivalencia

5.6 Síntesis de análisis de resultados

A modo de resumen a partir del análisis de los resultados de la *Sección 5.5*, es posible destacar los siguientes puntos:

- *Mayor incidencia del factor velocidad relativa de la red troncal.* En comparación con el resto de los parámetros de configuración del algoritmo (*Costo Máximo por recorrido* y *Restricción Cíclica*), el factor vel_{rel} es el que mayor incidencia tiene en la mayoría de las métricas analizadas. En especial, el factor vel_{rel} es determinante en el comportamiento de las soluciones obtenidas con respecto a las métricas de Función Objetivo, es decir, en *Costo de Usuario* y *Costo de Operación*. Si bien es el factor que tiene más peso, a su vez es el que tiene un mayor costo asociado en términos económicos y de infraestructura para el sistema de transporte. No es trivial hacer cambios significativos en la operativa de la red troncal, ya que un aumento sustancial en la velocidad relativa de la troncal, puede significar un cambio en el medio de transporte que opera la red troncal, por ejemplo, de ómnibus a BRT, o de BRT a tren elevado o metro.
- *CM y RC como reguladores de la calidad de la solución.* Tras las pruebas realizadas se confirma la importancia de los factores *Costo Máximo por recorrido* y *Restricción Cíclica* como reguladores de la calidad de la solución en términos de usuarios y operadores. Es decir, que a través de estos parámetros de diseño de la red alimentadora, es posible balancear la solución (en términos de costos) atendiendo los intereses de los actores del sistema de transporte que en principio son contrapuestos. En general, los sistemas de transporte público requieren de subsidios para su funcionamiento, por lo que es de interés que los mismos no sobrepasen cierto nivel de gasto. Idealmente lo que se busca por parte del planificador es tener la mejor solución para los usuarios; para que dicha solución sea sustentable desde el punto de vista económico de los operadores, es necesario bajar los costos de operación con el consecuente aumento de los costos para usuarios. Por otro lado, hacer cambios en dichos parámetros no es costoso, ya que únicamente impactan en la longitud de los recorridos generados como solución, y no es necesario grandes inversiones en infraestructura o tecnología.

Resumen, conclusiones y trabajo a futuro

En este capítulo se incluye la sección *Resumen*, donde se recapitula y sintetiza los aspectos más relevantes del trabajo realizado durante el presente proyecto. La sección *Fuentes de dificultad*, destaca fuentes de dificultad identificadas a lo largo del trabajo, que tienen que ver tanto con la definición del problema como con el procesamiento de datos. En la sección *Conclusiones*, se reúnen conclusiones generales acerca del proyecto en particular y enseñanzas que dejó el mismo. Por último, en la sección *Trabajo a futuro*, se señalan áreas del trabajo para las cuales se cree que existe posibilidad de mejoras y trabajo a futuro.

6.1 Resumen

En este trabajo se plantea como objetivo inicial el estudio del problema general del diseño de redes de transporte público, pero en particular, el diseño de recorridos alimentadores para sistemas de transporte público multimodal, en base a información de demanda de viajes interzonales, mediante la resolución de modelos de optimización combinatoria. En la literatura se encuentra el FBNDP (*Feeder Bus Network Design Problem*), el cual resuelve problemas de similares características, pero no atiende la naturaleza interzonal de la demanda. Para ello es que se extiende el FBNDP, para introducir así el EFBNDP (*Extended Feeder Bus Network Design Problem*).

Se propone un modelo de optimización combinatoria y se desarrolla el algoritmo EPIA (*Extended Pair Insertion Algorithm*) para su resolución, a partir de la adaptación de un algoritmo existente (PIA, *Pair Insertion Algorithm*). Estos permiten estudiar el efecto de ciertos parámetros operacionales y de diseño sobre el desempeño de una red de transporte público con estructura jerárquica, desde el punto de vista de usuarios y operadores.

Se aplica el algoritmo desarrollado a un caso de estudio real sobre la ciudad de Montevideo considerando corredores troncales definidos en el Plan de Movilidad, para el cual se procesa información de la red vial existente y además, se obtiene una caracterización de la demanda interzonal a partir de una estimación de viajes existente, mediante una transformación de los datos.

Además de la generación y visualización de soluciones para el problema de diseño de redes de segundo nivel, se hace un estudio que permite evaluar los costos del sistema para los usuarios y los operadores, así como también distintas medidas respecto al uso de la red y los beneficios de la red troncal.

6.2 Fuentes de dificultad

Durante el transcurso de este proyecto se han identificado tres fuentes de dificultad que valen la pena destacar.

6.2.1 Definición del problema

Si bien a lo largo de la literatura consultada ya se encontraban definidos problemas similares, como los son el TNDP y el FBNDP, dadas las características del problema que se busca resolver en este trabajo, es que fue necesario definir un nuevo problema, el EFBNDP (*Sección 2.2*). El hecho de identificar y definir el EFBNDP resultó en una fuente de dificultad en sí misma, ya que al inicio del presente proyecto no se contaba con un antecedente consistente sobre el cual basarse. Por lo que fue necesaria una amplia revisión bibliográfica para verificar conceptos relacionados a la definición del problema y el modelo a proponer.

6.2.2 Procesamiento de la información de la red vial

El procesamiento de datos geográficos no resultó un tema menor debido a su gran importancia durante el presente trabajo. La generación de un grafo que represente la red a partir de la información geográfica disponible presenta una fuente de dificultad que no debe subestimarse, ya que inconsistencias en el formato de los datos pueden impedir la correcta generación de la red. En este trabajo en particular, este problema fue solucionado mediante la generación de un script que procesa y corrige los datos geográficos obtenidos inicialmente, produciendo así, una red apta para ser procesada por el componente de construcción definido en la *Sección 3.2*.

Sumado a esto, el hecho de tener que adquirir conocimiento en el manejo de sistemas de información geográfica, en particular en la herramienta QGIS, fue determinante, ya que de otra manera no hubiese sido posible llevar a cabo un trabajo de estas características.

6.2.3 Procesamiento y transformación de datos para generación de la matriz OD

A la hora de generar la matriz de demanda se contaba con una estimación disponible en base al conteo del uso de la tarjeta STM, la cual está desagregada a nivel de paradas. Si bien esta información resulta muy útil, fue necesario transformarla para poder generar la matriz de demanda a un nivel de agregación acorde al de la zonificación definida para este trabajo. Se desarrolló un script para llevar a cabo la transformación, el cual se describe en detalle en el *Anexo I*; a grandes rasgos lo que hace es asociar la información de demanda de cada parada a una zona, de forma tal que se pueda agrupar la demanda a un nivel zonal dado.

6.3 Conclusiones

Las fuentes de dificultad mencionadas en la *Sección 6.1*, traen consigo enseñanzas y conclusiones en cuanto al abordaje de la problemática y a la gestión de este tipo de investigaciones. A raíz de estas se puede afirmar que el diseño de redes de transporte público es un problema muy complejo y de difícil formulación debido a la gran cantidad de aspectos a considerar.

Un tema no menor y que debe tomarse en consideración es el relativo al tiempo requerido para obtener, procesar y preparar los datos necesarios en varias etapas del trabajo. La preparación de los datos fue una fuente de dificultad importante; especialmente el hecho de desarrollar y automatizar el

proceso de la transformación de datos requirió una porción de tiempo significativa del proyecto. Además, debe tomarse en cuenta que en la mayoría de los casos, los datos de entrada, ya sean de demanda, información geográfica de la red, entre otros, son creados por agentes externos, por lo cual no puede asumirse la total correctitud o consistencia de los mismos o que estos se adapten directamente a las necesidades del proyecto en particular, y probablemente sea necesario un procesamiento adicional previo a su uso.

Los resultados generados por el algoritmo implementado a lo largo de este trabajo, es decir, los recorridos de segundo nivel, pueden ser utilizados como asistencia a la toma de decisiones estratégicas en el diseño de redes alimentadoras, pues ofrecen una primera solución aproximada al problema de la generación de recorridos alimentadores. De hecho, es necesario un posprocesamiento manual para convertir dicha solución en recorridos practicables en la realidad (menos abstracta y más compleja que la asumida a la hora de modelar el problema). Analizando el caso de estudio propuesto, el número de recorridos de segundo nivel generados como solución (entre 419 y 627) es bastante mayor que los existentes al día de hoy para la ciudad de Montevideo (alrededor de 140 líneas); esto se debe a que no había una cota específica para la cantidad de recorridos y lo que se buscaba principalmente era atender la mayor cantidad de demanda posible.

La introducción de una prueba de concepto con un caso real reducido (*Sección 4.1*) resultó de vital importancia, y su uso es altamente aconsejable en este tipo de trabajos, cuando lo que se quiere es validar la implementación en una red con alto nivel de detalle. Además de validar la implementación con el fin de obtener una versión funcional del algoritmo, la prueba de concepto sirve para detectar errores, implementar mejoras y mitigar los riesgos asociados a la implementación.

En definitiva, este trabajo puede ser de relevancia para el sistema de transporte público de la ciudad de Montevideo. En un contexto donde se hace necesario y hay conciencia de las autoridades en el rediseño de la red de transporte considerando una estructura tronco-alimentadora, es importante contar con herramientas que permitan sugerir soluciones (al menos para usar como marco de referencia) o evaluar propuestas, en relación a los recorridos alimentadores. A nivel mundial no se encuentran muchos trabajos que aborden esta problemática, y pese que se ha puesto mucho énfasis en la construcción de las troncales (que en general insume altos costos de inversión), el beneficio definitivo para la población depende significativamente de la componente de recorridos alimentadores del sistema, la cual no ha sido abordada con la misma relevancia.

6.4 Trabajo a futuro

Se identificaron diversas áreas del presente trabajo donde existe la posibilidad de mejoras y trabajo a futuro.

6.4.1 Modelo

- *Generación y optimización de frecuencias.* Sin dudas que el estudio del problema de optimización de frecuencias para recorridos de segundo nivel en redes de transporte público es una línea de investigación que queda abierta para trabajo a futuro. La complejidad que conlleva dicho estudio y el alcance definido para este proyecto de grado, hacen que el estudio de generación y optimización de frecuencias sea una investigación independiente en sí misma.

- *Considerar el sentido de las calles y recorridos.* Durante este proyecto se planteó como hipótesis de trabajo utilizar como representación de la red un grafo no dirigido con el fin de simplificar tanto el modelado como la implementación del algoritmo y así poder hacer foco en los objetivos y alcance del proyecto, más que en trabajar con una representación menos abstracta y menos simplificada de la realidad. Representar la red como un grafo dirigido implicaría el tratamiento del sentido de las calles y por ende de los propios recorridos generados como solución.

6.4.2 Estandarización de datos de entrada y salida

- *Automatización en los datos de entrada.* En el transcurso de este trabajo, tanto la generación de la matriz origen-destino como la generación de la red troncal fueron posibles gracias a un arduo procedimiento manual que incluyó la limpieza, depuración y estandarización de los datos de entrada. Desarrollar una solución (herramienta o script) que sea capaz de limpiar, depurar y estandarizar los datos de entrada de forma automática en un único paso.
- *Automatización en la visualización de resultados.* Si bien en la implementación actual del algoritmo desarrollado es posible obtener shapefiles que permiten la visualización de los recorridos solución, es necesario cargar manualmente dichos shapefiles en un sistema de información geográfica (SIG). A modo de ejemplo, se podría utilizar GeoServer [29] (un servidor open source para compartir datos geoespaciales) de manera tal de que a partir de los shapefiles generados, se pueda visualizar los recorridos disponibles en un sitio web de manera automática.

6.4.3 Algoritmo

- *Post procesamiento de recorridos.* Una vez que los recorridos de segundo nivel son generados como solución, estos podrían ser procesados para corregir pequeñas imperfecciones en el trazado de los mismos, producto de la asignación de paradas en la red. Además, si se buscara limitar la cantidad de recorridos generados como solución, se podría unir convenientemente los tramos de recorridos cortos de manera tal de formar un recorrido de mayor extensión (procurando no aumentar significativamente el costo para los usuarios).
- *Asignación dinámica de paradas.* En la implementación actual, cuando se procesa la red, al momento de asignar las paradas a los centroides de zona, se asigna como parada la intersección más cercana al centroide. Esta decisión en la implementación hace que los trazados de los recorridos sean algo irregulares. Una asignación dinámica de paradas a la hora de construir el recorrido, es decir, seleccionar un nodo conveniente dentro de un radio de acción razonable, puede corregir imperfecciones en el trazado de los recorridos que se obtienen como solución.
- *Mejora de performance en ejecución del algoritmo.* Dado el alto costo computacional que tiene el componente de inserción, se identifica como una posible mejora el uso de paralelismo en dicho componente. Específicamente, el tiempo de ejecución de la evaluación de posiciones en el componente de inserción podría llegar a reducirse mediante el uso de *threads*.

Referencias

- [1] D. Teodorović y M. Janić, «Chapter 7 - Public Transportation System,» de *Transportation Engineering*, Butterworth-Heinemann, 2017, p. 387 - 493.
- [2] J. Dodson, P. Mees, J. Stone y M. Burke, «The principles of public transport network planning: A review of the emerging literature with select examples,» *Urban Research Program*, vol. 15, 2011.
- [3] Intendencia de Montevideo, «Plan de Movilidad,» https://montevideo.gub.uy/sites/default/files/plan_de_movilidad.pdf, 2010.
- [4] A. Mauttone Vidales, «Optimización de recorridos y frecuencias en sistemas de transporte público urbano colectivo,» UR. FI-INCO, Tesis de Maestría en Informática, 2005.
- [5] M. H. Baaj y H. S. Mahmassani, «An AI-based approach for transit route system planning and design,» *Journal of Advanced Transportation*, vol. 25, nº 2, p. 187–210, 1991.
- [6] G. K. Kuah y J. Perl, «The Feeder-Bus Network-Design Problem,» *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 40, nº 8, p. 751-767, 1989.
- [7] A. Mauttone y M. E. Urquhart, «A route set construction algorithm for the transit network design problem,» *Computers and Operations Research*, vol. 36, nº 8, p. 2440–2449, 2009.
- [8] República Oriental del Uruguay, «Catálogo de Datos Abiertos,» [En línea]. Disponible: <https://catalogodatos.gub.uy/>.
- [9] R. Massobrio, «Urban mobility data analysis in Montevideo, Uruguay,» UR. FI-INCO, Tesis de Maestría en Informática, 2018.
- [10] QGIS, version 3.10, [En línea]. Disponible: <https://qgis.org>.
- [11] F. Ciaffi, E. Cipriani y M. Petrelli, «Feeder Bus Network Design Problem: a New Metaheuristic Procedure and Real Size Applications,» *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 54, p. 798-807, 2012.
- [12] A. S. Mohaymany y G. Ali, «Multimodal Feeder Network Design Problem: Ant Colony Optimization Approach,» *Journal of Transportation Engineering*, vol. 136, nº 4, p. 323–331, 2010.
- [13] M. H. Almasi, A. Sadollah, Y. Oh, S. Kang y D.-K. Kim, «Optimal coordination strategy for an integrated multimodal transit feeder network design considering multiple objectives,» *Sustainability*, vol. 10, nº 3, 2018.
- [14] R. Borndörfer, M. Grötschel y M. E. Pfetsch, «A Column-Generation Approach to Line Planning in Public Transport,» *Transportation Science*, vol. 40, nº 1, p. 123-132, 2007.

- [15] H. Cancela, A. Mauttone y M. E. Urquhart, «Mathematical programming formulations for transit network design,» *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 77, p. 17-37, 2015.
- [16] «JGraphT 1.3.0,» JGraphT, [En línea]. Disponible: <https://jgrapht.org/>.
- [17] «Guava v28.0,» Google, [En línea]. Disponible: <https://guava.dev/>.
- [18] «neo4j 3.5,» Neo4j, Inc., [En línea]. Disponible: <https://neo4j.com/>.
- [19] T. P. Peixoto, «graph-tool 2.29,» [En línea]. Disponible: <https://graph-tool.skewed.de/>.
- [20] «NetworkX 2.4,» NetworkX, [En línea]. Disponible: <https://networkx.github.io/>.
- [21] Environmental Systems Research Institute, Inc, «ESRI Shapefile Technical Description,» New York, 1997.
- [22] «pandas,» pandas, [En línea]. Disponible: <https://pandas.pydata.org/>.
- [23] OpenPyUtils y R. Kern, «line_profiler and kernprof,» [En línea]. Disponible: https://github.com/pyutils/line_profiler.
- [24] A. Mauttone y D. Hernández, «Encuesta de movilidad del área metropolitana de Montevideo. Principales resultados e indicadores (report),» Montevideo: CAF, Intendencia de Montevideo, Intendencia de Canelones, Intendencia de San José, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, Universidad de la República, PNUD Uruguay. Disponible: <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/1078>, 2017.
- [25] Intendencia de Montevideo, «Tarjetas STM,» [En línea]. Disponible: <https://montevideo.gub.uy/transito-y-transporte/tarjetas-stm-0>. [Último acceso: 15 10 2020].
- [26] S. C. Wirasinghe, L. Kattan, M. Rahman, J. Hubbell, R. S. Thilakarathne y S. Anowar, «Bus Rapid Transit (BRT) - a review,» *International Journal of Urban Sciences*, vol. 17, p. 1-31, 2013.
- [27] R. Massobrio, «Análisis de datos de movilidad urbana en Montevideo, Uruguay,» de *Workshop internacional: planificación de transporte y ciudades inteligentes*, Montevideo, 2019.
- [28] V. R. Vuchic, *Urban Transit Systems and Technology*, Wiley, 2007.
- [29] «GeoServer,» Open Source Geospatial Foundation, [En línea]. Disponible: <http://geoserver.org/>.
- [30] R. Massobrio, «Origin-destination matrices,» [En línea]. Disponible: <https://www.fing.edu.uy/~renzom/msc/#od-matrices.md>. [Último acceso: 20 09 2020].
- [31] República Oriental del Uruguay, «Transporte colectivo: paradas y puntos de control,» [En línea]. Disponible: <https://catalogodatos.gub.uy/dataset/intendencia-montevideo-transporte-colectivo-paradas-y-puntos-de-control>. [Último acceso: 20 09 2020].
- [32] G. Faller, «Diseño Optimizado de un Backbone de Transporte Metropolitano para Montevideo,» UR. FI-INCO, Informe Actividad Integradora, Licenciatura en Computación, 2019.

- [33] D. Canca, A. De-Los-Santos, G. Laporte y J. A. Mesa, «An adaptive neighborhood search metaheuristic for the integrated railway rapid transit network design and line planning problem,» *Computers & Operations Research*, vol. 78, p. 1-14, 2017.
- [34] L. Cadarso, L. F. Escudero y A. Marín, «On strategic multistage operational two-stage stochastic 0–1 optimization for the Rapid Transit Network Design problem,» *European Journal of Operational Research*, vol. 271, nº 2, p. 577-593, 2018.
- [35] C. Risso y S. Nesmachnow, «Designing a Backbone Trunk for the Public Transportation Network in Montevideo, Uruguay,» de *Smart Cities*, Springer International Publishing, 2020, p. 228-243.

Generación de Matriz origen-destino

Uno de los objetivos de este trabajo es aplicar el algoritmo desarrollado para la resolución del EFBNDP a un caso de estudio de mediano o gran porte, en particular para la ciudad Montevideo, en base información de demanda de viajes interzonales.

Disponer de la demanda de viajes a un nivel acorde con la zonificación definida en la *Sección 5.5.1*, representa un reto, pues la única fuente de datos de demanda con la que se cuenta es la estimación en base al conteo de uso de la tarjeta STM [9], la cual se encuentra con un nivel de agregación con más detalle, ya que la demanda para la ciudad de Montevideo en ese trabajo es a nivel de paradas. En este anexo se describe el proceso de transformación de dichos datos, mediante el cual se obtiene la matriz origen-destino que caracteriza la demanda interzonal.

La matriz origen-destino a nivel de paradas cuenta con 1.100.675 entradas y se encuentra disponible en un archivo CSV [30]; cada línea del mismo cumple con el siguiente formato:

$$o_i, d_i, n$$

donde:

- o_i es el identificador de la parada origen
- d_i es el identificador de la parada destino
- n es la cantidad de viajes desde o_i hasta d_i

Los identificadores de paradas son los definidos en el shapefile de datos abiertos [31] que se corresponden con las paradas de ómnibus de la ciudad de Montevideo.

Teniendo en cuenta entonces que la información está a nivel de paradas, el primer paso del proceso de transformación de los datos es asociar cada parada del shapefile de paradas a la zona correspondiente con la zonificación definida. Para ello lo que se hace es interceptar ambos shapefiles en la herramienta QGIS:

- Cargar shapefile de paradas.
- Cargar shapefile de zonificación.
- Vector > Geoprocessing Tools > Intersection.
- Exportar como CSV el shapefile resultado de la intersección.

Se obtiene un archivo CSV, el cual representa la asignación de cada parada a un código de zona correspondiente con la zonificación, con el siguiente formato:

$$p_i, zk$$

donde:

- p_i es el identificador de parada
- zk es el código de zona

Cabe resaltar que las paradas a las cuales no es posible asignar un código de zona debido a que quedan fuera de la zonificación definida, no son incluidas en el CSV (esto es importante ya que dichas paradas serán filtradas y no formarán parte de la matriz origen-destino final).

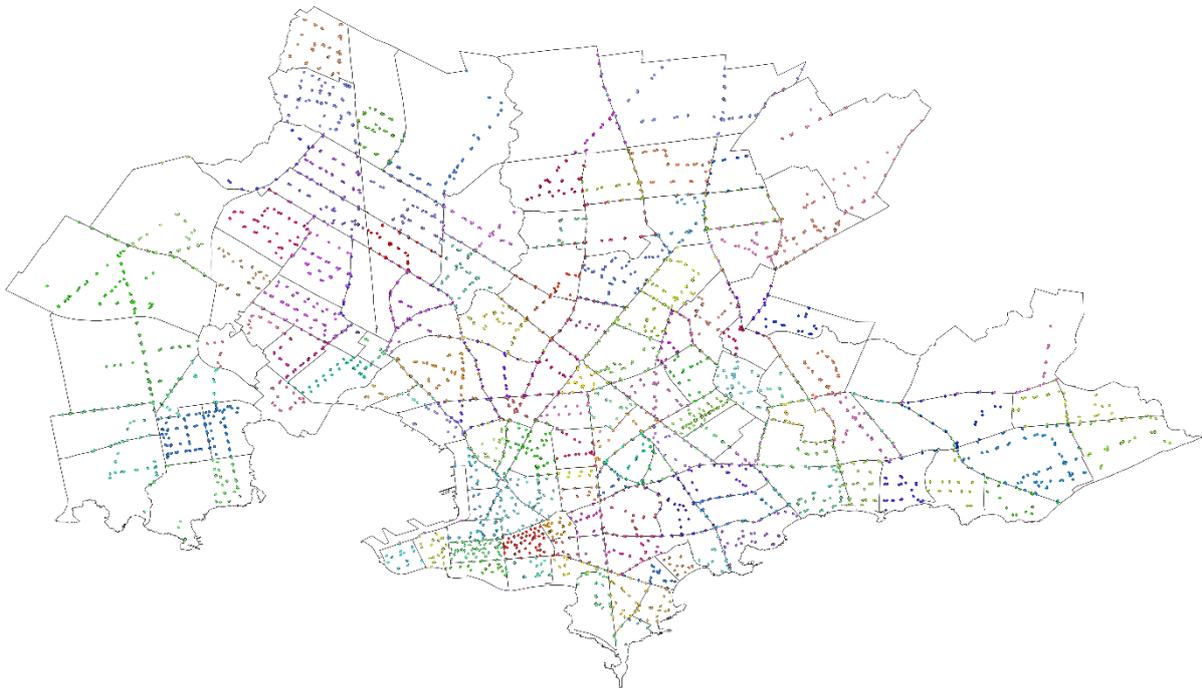


Ilustración 61 Intersección de paradas con zonificación

Con ambos CSV como insumos y haciendo uso de las funcionalidades del paquete *pandas* [22], se cargan ambas matrices y se combinan las mismas mediante la función *merge*, de forma tal de construir una matriz intermedia que cuente con la información de las zonas. Cada línea del CSV resultante tiene el siguiente formato:

$$o_i, zo_i, d_i, zd_i, n$$

donde:

- o_i es el identificador de la parada origen
- zo_i es el código de zona origen
- d_i es el identificador de la parada destino
- zd_i es el código de zona destino
- n es la cantidad de viajes desde o_i/zo_i hasta d_i/zd_i

De esta manera ahora es posible no solo identificar la demanda de viajes entre paradas, si no que el hecho de haber etiquetado cada parada con una zona de la zonificación, hace que se pueda representar la demanda a nivel de zonas.

El siguiente paso, es convertir la matriz intermedia en la matriz origen-destino de demanda interzonal, para esto es necesario depurar los datos de dicha matriz:

1. Remover las columnas que identifican las paradas origen y destino (ya no son necesarias).

2. Remover entradas de la matriz intermedia para las cuales la demanda de viajes es intrazonal, es decir, aquellas entradas para las que las paradas quedaron asociadas a una misma zona (zo_i coincide con zd_i).
3. Agrupar entradas de la matriz intermedia por zona de origen y zona de destino y sumando la demanda agregada (se hace uso de la funciones *groupby* y *sum*, `groupby(['zona_origen', 'zona_destino'])['cant_viajes'].sum()`)

Como resultado de los pasos anteriores, se llega a la matriz origen-destino que cuenta con 17.928 entradas que caracteriza la demanda interzonal, donde cada entrada tiene el siguiente formato:

$$zo_i, zd_i, n$$

donde:

- zo_i es el código de zona origen
- zd_i es el código de zona destino
- n es la cantidad agregada de viajes interzonales desde zo_i hasta zd_i

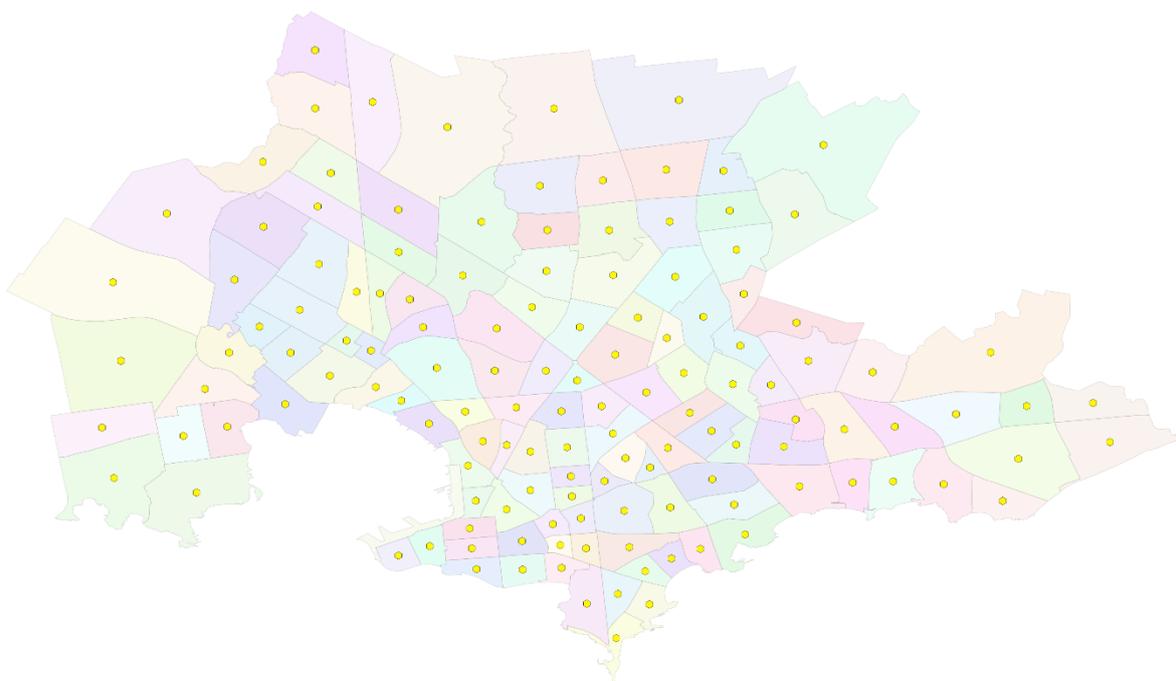


Ilustración 62 Centroides de zona como concentrador de demanda

La matriz de demanda a nivel de zonas generada para la ciudad de Montevideo se pone a disposición del grupo de investigación que enmarca a este proyecto, de manera que pueda ser utilizada en futuros trabajos que así lo requieran.

Construcción de la Red

La construcción de una representación de la red de transporte a partir de la información geográfica disponible, y que a su vez a partir de la misma sea posible generar un grafo que permita la posterior ejecución de algoritmos de redes (como pueden ser algoritmos para la obtención de caminos más cortos) es una tarea que no debe subestimarse dado su alto grado de complejidad, como se menciona en la *Sección 6.1.2*.

Para una mejor comprensión, este anexo tiene el objetivo de presentar con un mayor grado de detalle, respecto al mencionado en el cuerpo principal de este informe, cómo fue posible partiendo de los datos abiertos para la ciudad de Montevideo, generar el grafo utilizado por el algoritmo EPIA.

Se explica el procedimiento aplicado a los datos abiertos, el cual consiste en la ejecución de dos algoritmos. El primero es el encargado de generar la representación de la red incluyendo calles y esquinas (aristas y nodos respectivamente), así como también los centroides y otros metadatos.

```
procedure crear_shapefiles
1:  $G \leftarrow$  leer shapefile de calles de los datos abiertos
2: Procesar  $G$  para convertir el grafo en no dirigido, eliminar calles
   peatonales, aristas de largo 0 y nodos aislados/desconectados.
3: Crear el metadato weight para las aristas e inicializarlo con el largo en
   km.

4: centroides, walking_paths  $\leftarrow$  Generar lista de centroides y walking
   paths utilizando QGIS.

5: Crear el metadato centroide para los nodos e inicializarlo con 0.
6: Crear el metadato wp para las aristas e inicializarlo con 0.
7: Agregar nodos centroides al grafo  $G$ , con el metadato centroide inicial-
   izado 1.
8: Agregar aristas walking_paths al grafo  $G$ , con el metadato wp inicial-
   izado en 1 y el metadato weight inicializado en 0.

9: Crear el metadato troncal para los nodos e inicializarlo con 0.
10: Crear el metadato parada para los nodos e inicializarlo con 0.

11: Generar identificación de nodos a partir de las coordenadas  $(x, y)$ .
12: Generar identificación de aristas a partir de la tupla de coordenadas de
   los nodos extremo de la arista  $((x1, y1), (x2, y2))$ .

13: Escribir shapefile de nodos.
14: Escribir shapefile de aristas.
end crear_shapefiles
```

Ilustración 63 Algoritmo de Creación de Shapefiles, Construcción de la Red

Para esto, se toma como insumo un algoritmo existente, generado como parte del análisis de datos de movilidad urbana para Montevideo [27], el cual es adaptado y extendido para satisfacer las necesidades de este trabajo, obteniendo así el algoritmo Crear Shapefiles (*Ilustración 63*).

Luego de obtener los shapefiles correspondientes a nodos y aristas (esquinas y calles), utilizando QGIS se procede a modificar manualmente los shapefiles, para así agregar la representación de la red troncal, tal como se explica en Construcción de la red troncal (*Sección 5.3.1*).

En este punto, se cuenta con la representación geoespacial completa de la red de transporte a ser utilizada. Sin embargo, a pesar de ser algo que no se puede apreciar a simple vista, estos shapefiles arrastran un error desde la línea 1 del algoritmo Crear Shapefiles. El mismo provoca que un grafo generado a partir de la lectura de los shapefiles (mediante el uso de funciones de la librería NetworkX) no sea consistente en la asociación de nodos y aristas en el grafo, obteniendo así un grafo que no se corresponde con la distribución geoespacial que podemos visualizar en QGIS.

El motivo de este problema se da por diferencias en la precisión de las coordenadas de los nodos autogenerados a partir del shapefiles de calles del conjunto de datos abiertos. Esto introduce nodos corruptos, ya que para la intersección de dos aristas se generan dos nodos distintos, con solo una de las aristas conectada a cada nodo en lugar de generar un único nodo al que se conectan ambas aristas. El par de nodos que se generan de manera automática difieren únicamente en la última cifra decimal, ya sea para la coordenada x o la coordenada y.

Para limpiar y corregir los datos corruptos es que se construye el algoritmo Reparar Shapefiles (*Ilustración 64*), el cual se encarga de corregir las imprecisiones en las coordenadas de los nodos, para así generar un grafo a partir del shapefile sin datos corruptos ni imprecisiones.

Algorithm 2 Reparar Shapefiles

```
procedure reparar_shapefiles
1:  $G \leftarrow$  Generar grafo a partir de la lectura de los shapefiles de nodos y
   aristas
2:  $H \leftarrow \emptyset$ 

3: for each  $node$  in  $G$  do
4:    $new\_node \leftarrow$  formatearCoordsNode( $node$ )
5:    $H \leftarrow$  Agregar nodo  $new\_node$ .
6: end for

7: for each  $edge$  in  $G$  do
8:    $new\_edge \leftarrow$  formatearCoordsEdge( $edge$ )
9:    $H \leftarrow$  Agregar arista  $new\_edge$ .
10: end for

11: Escribir shapefile de nodos del grafo  $H$ 
12: Escribir shapefile de aristas del grafo  $H$ 
end reparar_shapefiles
```

Ilustración 64 Algoritmo de Reparación de Shapefiles, Construcción de la Red

En el caso puntual del shapefile de datos abiertos, los nodos son generados con nueve cifras decimales de precisión. La función *formatearCoordsNode* toma el nodo que recibe como parámetro de entrada y genera un nodo idéntico, es decir, replicando todos sus metadatos, pero modificando las coordenadas x e y para truncar su precisión en ocho cifras decimales. Por otra parte, si bien las aristas no tienen un problema de precisión de coordenadas, para poder agregar la arista al nuevo grafo, se debe replicar la misma pero corrigiendo las coordenadas de los nodos a los que la arista se conecta. Esto es realizado por la función *formatearCoordsEdge* la cual se encarga de replicar la arista y ejecutar *formatearCoordsNode* para obtener correctamente los nodos a los que se debe conectar.

Los shapefiles generados para la ciudad de Montevideo se ponen a disposición del grupo de investigación que enmarca a este proyecto, de manera que puedan ser utilizados en futuros trabajos que así lo requieran.

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Fragmento del mapa general del sistema de transporte. Red Metropolitana de Movilidad, Chile	2
Ilustración 2 Corredores troncales. Plan de movilidad Intendencia de Montevideo	4
Ilustración 3 Representación de la red	10
Ilustración 4 Componente de construcción, tomado de [6]	17
Ilustración 5 Inserción de pares, tomado de [6]	17
Ilustración 6 Componente de construcción, Extended Pair Insertion Algorithm	18
Ilustración 7 Posprocesamiento de recorridos	20
Ilustración 8 Método de Inserción de Pares para EPIA.....	21
Ilustración 9 Subconjunto seleccionado de la red de calles de Montevideo.....	25
Ilustración 10 Red de calles y corredor troncal de zona centro-sur	26
Ilustración 11 Zonificación utilizada para la validación del algoritmo	27
Ilustración 12 Caso de Prueba 1.....	28
Ilustración 13 Caso de Prueba 2.....	29
Ilustración 14 Caso de Prueba 3, sin inserción de pares.....	30
Ilustración 15 Caso de Prueba 3, con inserción de pares	31
Ilustración 16 Caso de Prueba 4.....	32
Ilustración 17 Caso de Prueba 4, orden inverso	33
Ilustración 18 Caso de Prueba 5, CM 10.0	34
Ilustración 19 Caso de Prueba 5, CM 5.0	35
Ilustración 20 Caso de Prueba 6, RC 1.0	36
Ilustración 21 Caso de Prueba 6, RC 1.5	37
Ilustración 22 Caso de prueba 7.....	38
Ilustración 23 Delimitación zonal por barrios según INE	41
Ilustración 24 Delimitación de zonas de análisis de tráfico	42
Ilustración 25 Ubicación de paradas de ómnibus, Montevideo, Uruguay.....	43
Ilustración 26 Corredores troncales definidos para el caso de estudio.....	44
Ilustración 27 Visualización de recorridos generados de la Prueba 1	51
Ilustración 28 Visualización de recorridos generados de la Prueba 2	52
Ilustración 29 Visualización de recorridos generados de la Prueba 3	53
Ilustración 30 Visualización de recorridos generados de la Prueba 4	54
Ilustración 31 Visualización de recorridos generados de la Prueba 5	55
Ilustración 32 Visualización de recorridos generados de la Prueba 6	56
Ilustración 33 Visualización de recorridos generados de la Prueba 7	57
Ilustración 34 Visualización de recorridos generados de la Prueba 8	58
Ilustración 35 Visualización de recorridos generados de la Prueba 9	59
Ilustración 36 Visualización de recorridos generados de la Prueba 10	60
Ilustración 37 Visualización de recorridos generados de la Prueba 11	61
Ilustración 38 Visualización de recorridos generados de la Prueba 12	62
Ilustración 39 Visualización de recorridos generados de la Prueba 13	63
Ilustración 40 Visualización de recorridos generados de la Prueba 14	64
Ilustración 41 Visualización de recorridos generados de la Prueba 15	65
Ilustración 42 Visualización de recorridos generados de la Prueba 16	66
Ilustración 43 Visualización de recorridos generados de la Prueba 17	67

Ilustración 44 Visualización de recorridos generados de la Prueba 18	68
Ilustración 45 Costos de usuario, incidencia del factor velocidad relativa	71
Ilustración 46 Costo de operadores y cubrimiento troncal, incidencia del factor velocidad relativa ..	73
Ilustración 47 Recorridos alimentadores, incidencia del factor de costo máximo.....	74
Ilustración 48 Costo de usuario, incidencia del factor de costo máximo	74
Ilustración 49 Métricas de clasificación de viajes, incidencia del factor de costo máximo	75
Ilustración 50 Costo de operadores, conjunto de pruebas 1 (2x), múltiples factores.....	77
Ilustración 51 Costo de Operadores, conjunto de pruebas 1 (2,5x), múltiples factores	78
Ilustración 52 Costo de Operadores, clases de equivalencia 2x y 2,5x.....	78
Ilustración 53 Costo de Operadores, clases de equivalencia.....	79
Ilustración 54 Costo de Usuarios, clases de equivalencia 2x y 2,5x.....	79
Ilustración 55 Cubrimiento Troncal, clases de equivalencia.....	80
Ilustración 56 Costo de Usuarios, clases de equivalencia.....	80
Ilustración 57 Viajes Troncal, clases de equivalencia	80
Ilustración 58 Viajes No Troncal, clases de equivalencia	81
Ilustración 59 Flujo Troncal, clases de equivalencia	81
Ilustración 60 Flujo Troncal (mixtos), clases de equivalencia	81
Ilustración 61 Intersección de paradas con zonificación	92
Ilustración 62 Centroides de zona como concentrador de demanda.....	93
Ilustración 63 Algoritmo de Creación de Shapefiles, Construcción de la Red	95
Ilustración 64 Algoritmo de Reparación de Shapefiles, Construcción de la Red	96

Índice de Tablas

Tabla 1 Beneficio obtenido por las mejoras al código	23
Tabla 2 Configuración de parámetros estandar para casos de prueba	27
Tabla 3 Matriz OD, caso de prueba 1	28
Tabla 4 Matriz OD, caso de prueba 2	29
Tabla 5 Caso de Prueba 3, recorridos generados sin inserción de pares	30
Tabla 6 Matriz OD, caso de prueba 4	32
Tabla 7 Matriz OD, caso de prueba 4, orden inverso	33
Tabla 8 Matriz OD, caso de prueba 5	34
Tabla 9 Caso de prueba 5, recorridos generados, CM 5.0	35
Tabla 10 Matriz OD, caso de prueba 6	36
Tabla 11 Caso de Prueba 7	38
Tabla 12 Plan de Pruebas detallado	50
Tabla 13 Resultados de la Prueba 1	51
Tabla 14 Resultados de la Prueba 2	52
Tabla 15 Resultados de la Prueba 3	53
Tabla 16 Resultados de la Prueba 4	54
Tabla 17 Resultados de la Prueba 5	55
Tabla 18 Resultados de la Prueba 6	56
Tabla 19 Resultados de la Prueba 7	57
Tabla 20 Resultados de la Prueba 8	58
Tabla 21 Resultados de la Prueba 9	59
Tabla 22 Resultados de la Prueba 10	60
Tabla 23 Resultados de la Prueba 11	61
Tabla 24 Resultados de la Prueba 12	62
Tabla 25 Resultados de la Prueba 13	63
Tabla 26 Resultados de la Prueba 14	64
Tabla 27 Resultados de la Prueba 15	65
Tabla 28 Resultados de la Prueba 16	66
Tabla 29 Resultados de la Prueba 17	67
Tabla 30 Resultados de la Prueba 18	68
Tabla 31 Resultados de todas las pruebas (1)	69
Tabla 32 Resultados de todas las pruebas (2)	70
Tabla 33 Comparación de pruebas (3) y (10)	76