

ANÁLISIS DE REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO DESDE LA PERSPECTIVA DEL USUARIO – CASO DE ESTUDIO DE LA CIUDAD DE SANTA FE

Luciano Marani¹ – Armando Guarnaschelli² – María Rosa Galli³

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe.

Lavaise 610 - S3004EWB Santa Fe - Argentina.

¹luciano_marani@hotmail.com.

²ag28@live.com.ar

³mrgalli@santafe-conicet.gov.ar

RESUMEN

En este trabajo, se desarrolla una metodología para la evaluación de redes de transporte público desde la perspectiva del usuario. En primer lugar, se define un modelo para predecir el comportamiento de los usuarios que viajan haciendo uso del sistema de transporte público. Luego se propone un conjunto de métricas aptas para evaluar la performance del sistema en general, así como también las zonas de la ciudad atendidas por el sistema de transporte. Esta metodología es validada aplicándola a un caso de estudio basado en el sistema de transporte público de la ciudad de Santa Fe.

Palabras clave:

Transporte público urbano
Redes de transporte
Redes espaciales
Optimización

ABSTRACT

In this work a methodology to evaluate public transportation systems from the perspective of the users is developed. First, a model to predict the behavior of the users travelling using public transport is defined. Then, a set of measures to quantify the performance of the system as well as evaluate each zone in the city are proposed. This methodology is validated by a case of study: the public transportation system in Santa Fe city, Argentine.

1. INTRODUCCIÓN

La escasez de recursos y los problemas medioambientales, puestos de manifiesto desde finales del siglo pasado, requieren que se minimice el impacto de las actividades humanas, incluido el transporte. Acorde a esto, es importante reducir el número de vehículos que circulan en las calles de cualquier ciudad, así como reducir las distancias y tiempos de los viajes que se lleven a cabo.

Una posible forma de minimizar estos impactos es contar con un sistema de transporte público que beneficie la movilidad de los usuarios dentro de la ciudad y los estimule a disminuir el uso de vehículos particulares.

En Argentina, los sistemas de transporte público son, generalmente, analizados desde la factibilidad operacional (basada en costos), sin considerar la utilidad que los usuarios pueden obtener del mismo. Este trabajo desarrolla una herramienta que permite medir al sistema de transporte público desde la perspectiva del usuario. Estas métricas pueden evaluar situaciones actuales o configuraciones hipotéticas.

Para modelar una red de transporte público, en este estudio, se la considera como una red espacial, ponderada y dirigida. En estas redes, cada nodo contiene información referida a un espacio geográfico (o geométrico).

2. ANÁLISIS DE REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO: TRABAJOS RELACIONADOS

El tema tratado en este trabajo se relaciona con el análisis de centralidad en calles, debido a que las herramientas de modelado utilizadas son similares. Estas herramientas se basan en el concepto de redes espaciales, las cuales contienen información geográfica como uno de los atributos de sus nodos. Algunos autores consideran las a intersecciones de calles como nodos y las calles como arcos. En estos modelos, el costo de cada arco es proporcional a la distancia que separa las intersecciones. Basándose en este tipo de modelos, en diversos trabajos se proponen medidas de centralidad para analizar las configuraciones urbanas. En [1], se relacionan métricas de centralidad con el periodo histórico en el cual las ciudades fueron fundadas. En [2] la distribución de probabilidad de nodos con determinados valores de métricas de centralidad se correlaciona con la forma en que se produce el desarrollo urbano (planificado o autogestionado). En [3], se evalúa la intensidad de uso del suelo utilizando herramientas similares.

Por otra parte, existen antecedentes que evalúan redes de transporte desde una perspectiva relacional (o topológica). De esta forma, el costo de un camino se relaciona con el número de nodos que recorre: no se considera información espacial. Esta técnica es usada en [4].

En [5], los autores evalúan un sistema de transporte, modelando la red geográfica y topológicamente según el indicador del cual trate, antes y después de una importante modificación en la infraestructura del mismo, para luego comparar resultados. En [6], se busca la forma de identificar nodos críticos en el sistema, los cuales son los que comprometen la performance de la red. En [7], se considera una red de transporte multimodal.

La relación entre estos trabajos y el que se presenta aquí, es la forma de modelar el sistema de transporte público, como red espacial y relacional simultáneamente. La principal diferencia es que en estos artículos los puntos geográficos considerados son únicamente los que tienen correspondencia con la infraestructura de la propia red; mientras que en el presente trabajo, además se considera que los viajes pueden conectar dos puntos cualesquiera de la ciudad y que las transferencias entre una línea de transporte y otra pueden darse aunque las estaciones no coincidan geográficamente.

3. MODELADO DE REDES DE TRANSPORTE PÚBLICO

Un viaje cualquiera se compone de segmentos realizados a pie y segmentos sobre la red de transporte público. Esta red es compuesta por diferentes líneas que ofrecen su servicio y pueden pertenecer a diferentes modos de transporte.

3.1. Elementos del modelo

Una línea de transporte público (colectivo, tren o cualquier otra), viaja a través de una ruta definida que puede ser dividida en segmentos entre estaciones (o paradas), las cuales son visitadas en un orden determinado. Por lo tanto, es posible considerar cada estación como un nodo perteneciente al grafo de la línea (*nodo línea*). La ruta es representada como arcos dirigidos que conectan nodos consecutivos (*arcos línea*).

Al tener en cuenta todas las líneas que componen un sistema de transporte público cualquiera, se obtiene un grafo compuesto por la superposición de los grafos de cada línea. Por el momento, estos grafos de línea se consideran desconectados. La Figura 1 muestra un ejemplo donde el sistema se compone de 3 líneas.

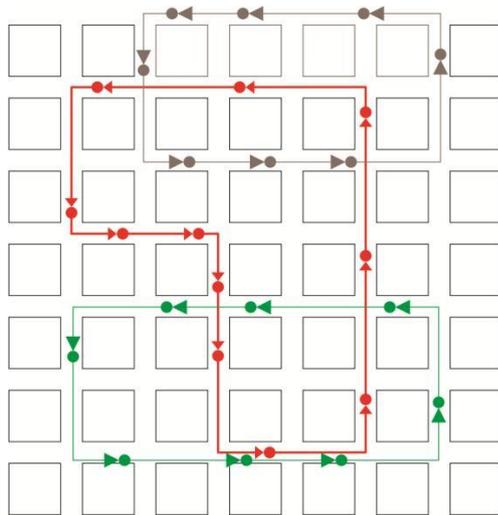


Figura 1 Ejemplo de grafo correspondiente a 3 líneas

Para acceder a un vehículo (que corresponde a una línea), un usuario debe esperar en la posición correspondiente a un *nodo línea*, es decir en una estación de transporte público. Cuando el vehículo llega a esa posición, el usuario puede acceder al mismo. Para modelar este cambio de estado, entre estar esperando y estar usando la red, se define un nuevo tipo de nodo: *nodo acceso*. Cada uno de estos se ubica superpuesto a un *nodo línea*. Por lo tanto, en este modelo, un usuario espera el arribo del vehículo en un *nodo acceso* y comienza a viajar cuando llega al *nodo línea* ubicado en la misma posición. Según el sentido de la transición descrita, se distinguen dos tipos de arco: los que van de un *nodo acceso* a un *nodo línea* (*arcos entrada*) y los que van en camino contrario (*arcos salida*). La Figura 2 muestra esquemáticamente cómo es la relación entre estos elementos.

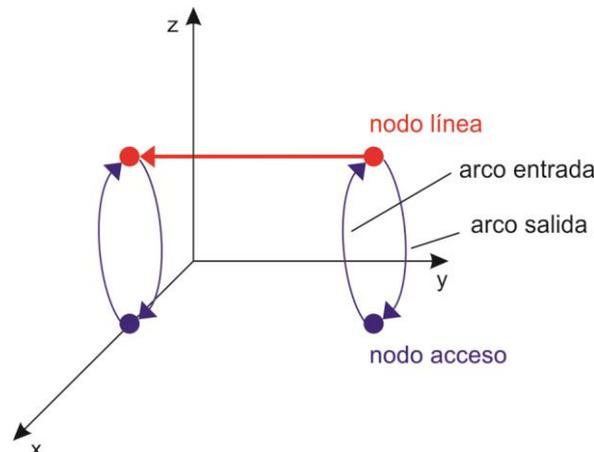


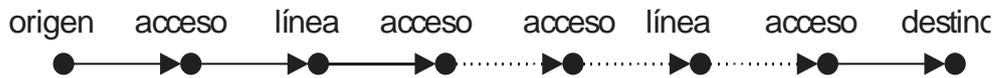
Figura 2 Nodos línea y entrada – arcos entrada y salida

Los viajes comienzan usualmente en puntos que no coinciden con las estaciones de transporte público. Entonces, el origen de un viaje cualquiera, se modela a través de un *nodo origen*. La conexión entre el *nodo origen* y los *arcos acceso* cercanos al mismo (restringidos por una *zona de influencia*), se da mediante *arcos origen*.

Análogamente, una vez descienden del vehículo, los usuarios deben desplazarse hasta su destino (*nodo destino*). Los arcos relacionados a este trayecto, se denominan *arcos destino*. Como, a priori, no se conoce la secuencia de nodos que describen el viaje óptimo, también se utiliza el concepto de *zona de influencia* para limitar la cantidad de *arcos destino* usados para modelar un viaje.

Además, como un viaje puede componerse de tramos que corresponden a diferentes líneas, es necesario modelar los tramos en los que un usuario desciende de un vehículo y se desplaza hasta otra estación para acceder a otro vehículo (de otra línea). Esto se logra mediante conexión entre *arcos acceso*, a través de *arcos acceso*.

Un viaje genérico entre dos puntos cualesquiera de la ciudad se representa mediante la siguiente cadena de nodos:



La Figura 3 expresa cómo se relacionan las acciones del usuario con los elementos del modelo:

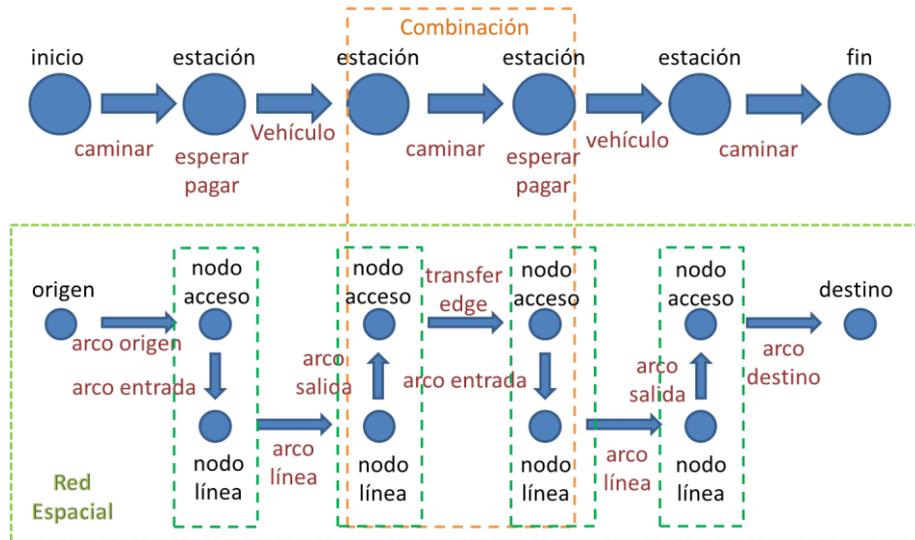


Figura 3 Acciones del usuario y su correspondencia con el modelo

Esta secuencia representa cómo el sistema de transporte público completo es modelado: el usuario comienza su viaje en un punto cualquiera, se dirige a una estación, espera, paga la tarifa, accede al vehículo, viaja una cierta distancia dentro del mismo, desciende y camina hasta su destino. Eventualmente, puede usar más de una línea, para lo cual desciende en una estación, camina hasta otra y vuelve a esperar, pagar y ascender a otro vehículo.

El conjunto de acciones se corresponde con lo descrito en los puntos anteriores y los elementos forman un único grafo conexo, sin zonas aisladas. Este grafo $G(N,A)$, se compone por nodos N y arcos A , que, según se ha desarrollado, pueden ser de diferentes tipos.

3.2. Costos

Una vez definida la manera en que se modela un viaje, es necesario considerar la forma en que los usuarios comparan las diversas alternativas.

Dependiendo del tipo de arco analizado, el costo puede incluir diferentes componentes: *caminata*, *espera*, *permanencia en el vehículo* y *tarifa*. El costo de los *arcos origen*, *destino* y *acceso* se relaciona con el largo de la caminata que representa, el costo de los *arcos entrada*, con la espera y el pago del boleto. El costo de los *arcos línea* tiene en cuenta el tiempo de permanencia del usuario en el vehículo. Entre otros, se puede mencionar como parámetro de cálculo para el costo de los arcos la velocidad promedio de los vehículos y de las personas, la distancia entre nodos, la frecuencia de cada línea, el valor de las tarifas. A su vez, se usan pesos relativos para cada uno de los parámetros que permiten agregar, o quitar, importancia a cada uno de ellos y normalizar las unidades.

Según el criterio elegido, el costo asociado a cada arco del grafo propuesto se verá modificado. Para cada una de las configuraciones obtenidas (variando el valor de los coeficientes de peso de cada componente de costo) se obtiene una matriz asociada al grafo. Usando algoritmos clásicos de camino de costo mínimo, tales como el algoritmo de Dijkstra, Bellman-Ford, Johnson, etc.; es posible obtener el camino óptimo para hacer cualquier viaje dentro de la ciudad, utilizando el transporte público. En [8], se presenta una revisión de los principales algoritmos de camino de costo mínimo.

4. MÉTRICAS DE PERFORMANCE DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO

Haciendo uso de las herramientas descritas anteriormente, es posible calcular el viaje óptimo entre dos puntos cualesquiera de una determinada ciudad, según diversos criterios.

Para observar el comportamiento del sistema completo, es necesario calcular el conjunto de todos los viajes óptimos dentro de la ciudad. Por lo tanto, es necesario definir un conjunto de lugares que representen todos los posibles orígenes y destinos de los viajes. A este conjunto se lo denomina *puntos representativos*. Considerando los viajes óptimos que unen cada posible par de *puntos representativos*, se logra caracterizar el sistema de transporte público para así obtener diferentes tipos de indicadores, o métricas.

Merece ser reiterado que dependiendo de los criterios de optimalidad elegidos, el conjunto de viajes óptimos será diferente, aunque siempre manteniendo el mismo conjunto de pares *origen-destino*. De esta forma, los análisis que la herramienta hace pueden enfocarse en distintos aspectos. Por ejemplo, si se analiza la utilidad de la red de transporte para personas con movilidad reducida, se le dará mayor peso a la distancia que los usuarios deben recorrer fuera de la misma que al valor de la tarifa.

Como dato de entrada, además de la configuración del sistema de transporte público de la ciudad (recorrido, frecuencia y tarifa de cada línea y representativos), se usa una matriz de intención de viaje, que indica cuántos usuarios está dispuestos a viajar entre cada par de *puntos representativos* (*origen-destino*). Usualmente los municipios cuentan con esta información, obtenida mediante encuestas.

La metodología propuesta se aplica de forma concreta en una herramienta computacional que, partiendo de los datos de entrada mencionados en el párrafo anterior, modela el sistema de transporte público tal como se describen en el apartado 3, calcula el conjunto de viajes óptimos y calcula métricas (definidas más adelante). Esta herramienta prevé que los criterios de optimalidad y las métricas calculadas pueden ser modificados.

Una vez obtenidos los caminos óptimos, que conectan cada par origen-destino, es posible calcular gran cantidad de indicadores. Se hace una propuesta que, aunque no exhaustiva, se considera útil para la toma de decisiones:

4.1.1. Métricas basadas en costo de viaje:

Costo de viaje: es el costo de cada viaje correspondiente a un par *origen-destino*.

Relevancia de costo de viaje: es el costo de un viaje, afectado por la proporción de intención de viaje correspondiente al mismo.

Costo de viaje característico: es la sumatoria de los costos de todos los posibles viajes.

Relevancia del costo de viaje por zona: es la suma de todas las relevancias de costo de viaje que tienen como origen un mismo *punto representativo* (misma *zona*).

Costo de viaje por zona: es la suma de los costos de los viajes que parten de la misma zona.

Costo de viaje estándar: se considera un viaje estándar aquel en el cual el usuario camina 100 m desde su origen hasta la estación más cercana, espera 10 min la llegada del vehículo, viaja sin hacer combinaciones con otras líneas hasta su última parada y luego camina otros 100 m hasta destino. Para cada par *origen-destino* el costo del viaje hipotético descrito se define como el costo de viaje estándar.

Relevancia de viaje estándar: es el costo de viaje estándar afectado por la proporción de intención de viaje asociado al par *origen-destino*.

Relevancia estándar por zona: es la sumatoria de las relevancias de viaje estándar de todos los viajes pertenecientes a una determinada zona.

4.1.2. Métricas basadas en número de combinaciones de línea:

Relevancia de la combinación: es la cantidad de veces que, en el conjunto de viajes óptimos, aparece cada par de líneas ($l-l_i$).

Porcentaje de viajes óptimos con combinaciones: es el cociente entre la cantidad de viajes óptimos que necesitan usar más de una línea y la cantidad total de viajes que caracterizan el sistema de transporte público.

4.1.3. Métricas basadas en distancia caminada:

Distancia caminada: es la longitud que un usuario debe caminar para recorrer el trayecto óptimo entre un determinado par *origen-destino*.

Distancia caminada por zona: es la distancia caminada para todos los viajes que parten desde la misma zona.

4.1.4. Métricas basadas en asignación de viajes:

Participación de la línea: es la cantidad de veces que una misma línea de transporte es usada en el conjunto de viajes óptimos.

Uso de la línea: es la cantidad de boletos que venderá una determinada línea.

5. CASO DE ESTUDIO: ANÁLISIS DE LA PERFORMANCE DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE LA CIUDAD DE SANTA FE

5.1. Situación actual

El sistema de transporte público de la ciudad de Santa Fe, cuenta con 14 líneas de colectivo y cada una de ellas conecta la zona céntrica con diferentes barrios. Esta distribución radial, lleva a que en las distintas calles del centro de la ciudad haya una importante concentración de líneas.

La Figura 4 muestra el recorrido de cada una de las líneas de colectivo.

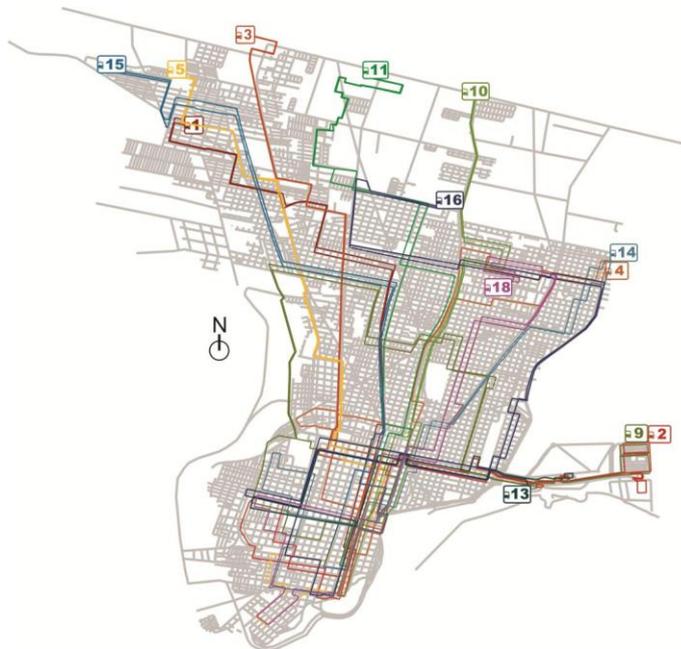


Figura 4 Sistema de Transporte Público de la ciudad de Santa Fe

Como conjunto de *puntos representativos* de la ciudad, se elige cada una de las 64 vecinales existentes en la ciudad, dado que presentan cierta uniformidad en cuanto al nivel socioeconómico y de infraestructura. La Figura 5 muestra la ubicación de cada una de estas vecinales, así como también la zona a la que representa.

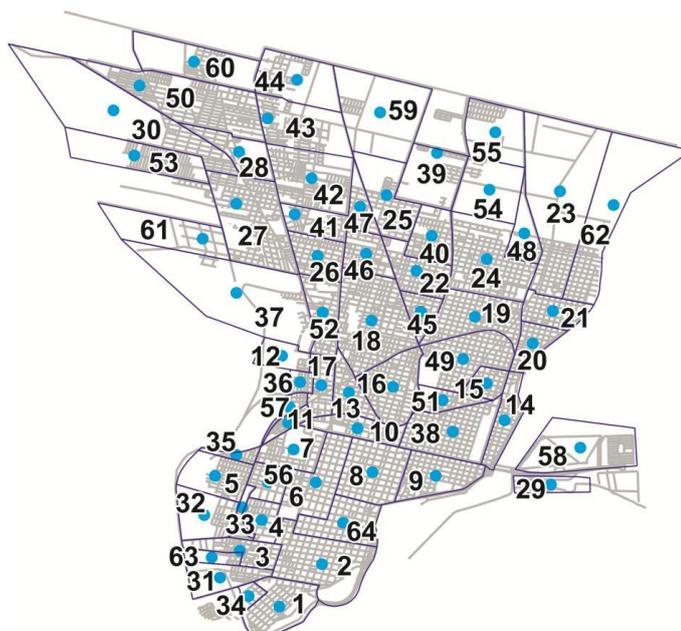


Figura 5 Vecinales de la ciudad de Santa Fe

Haciendo uso de la metodología anteriormente descrita, es posible calcular las métricas propuestas para cada uno de los *puntos representativos* (en este trabajo se exponen 3 de los posibles análisis, a modo de ejemplo). Para ilustrar mejor el uso de la herramienta, se propone la

comparación de dos situaciones: la *situación actual* y un escenario hipotético donde la línea número 10 es removida del sistema. A este último se lo denominará *escenario 1*.

Si bien es natural que, un sistema de transporte público con una línea menos, muestre una performance menor en cuanto a la utilidad para los usuarios, la comparación sirve para apreciar la sensibilidad de la herramienta y de las métricas a los cambios de configuración de la red.

Para el cálculo de los caminos óptimos se calibró el modelo de forma que el costo represente una suma ponderada de los cuatro componentes de costo previamente definidos: *caminata*, *espera*, *permanencia en el vehículo* y *tarifa*.

5.2. Comparación de escenarios

En esta sección se muestran algunos posibles análisis, a modo de ejemplo, que la metodología desarrollada en este trabajo y la correspondiente herramienta informática son capaces de llevar a cabo.

5.2.1. Distribución de costos de viaje

Haciendo uso de las métricas *costo de viaje* y *costo de viaje estándar*, se calcula cuanto más caro es el viaje óptimo entre cualquier par *origen-destino* que su correspondiente *viaje estándar*. Agrupando estos valores por zona, se obtiene un indicador para cada una de las mismas. La Figura 6 muestra el valor del indicador, mostrado en una escala de colores, en un mapa de la ciudad. La parte izquierda corresponde a la *situación actual* y la derecha al *escenario 1*. En las ilustraciones, se usarán las letras A y B para señalar respectivamente ambos casos. Se observa que los valores son considerablemente más bajos en la situación actual, dado que cuenta con una línea más.

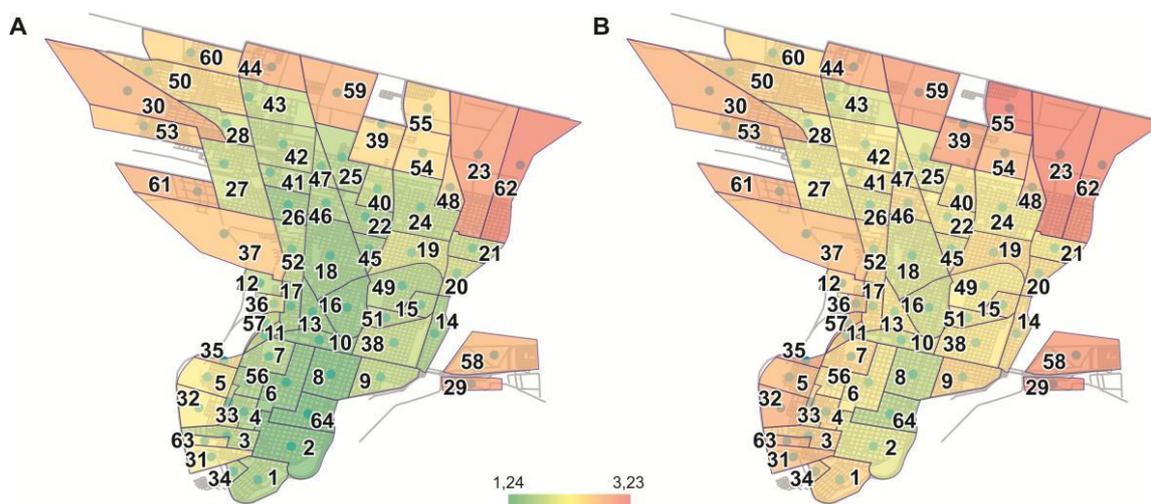


Figura 6 Costo de viaje por zona – Comparación de configuraciones

5.2.2. Distancia caminada

Calculando la distancia caminada promedio de todos los viajes que parten de una misma zona y volcada en el mapa de la ciudad, se observa que las zonas más afectadas por el cambio de situación se encuentran en el norte de la misma (Figura 7).

Considerando la distancia caminada en cada uno de los viajes óptimos, se obtiene que en la situación actual el 75% de los viajes requieren una caminata menor a 1,5 Km; mientras que en el escenario 1, este valor desciende a 67%. La Figura 8 muestra, para cada caso un histograma que indica la frecuencia con que se da cada rango de distancia caminada.

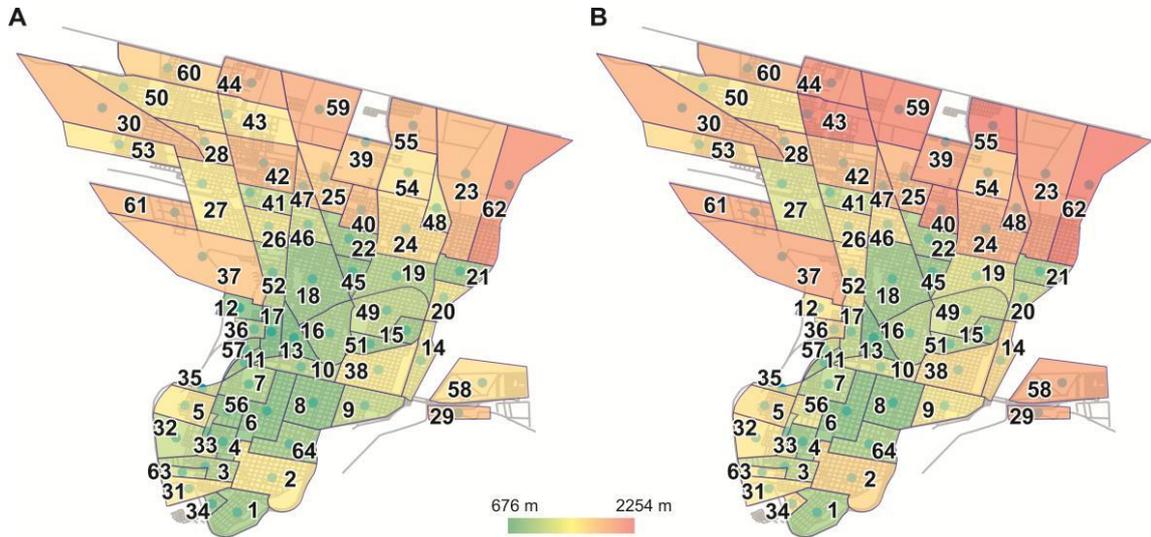


Figura 7 Distancia caminada por zona – Comparación de configuraciones

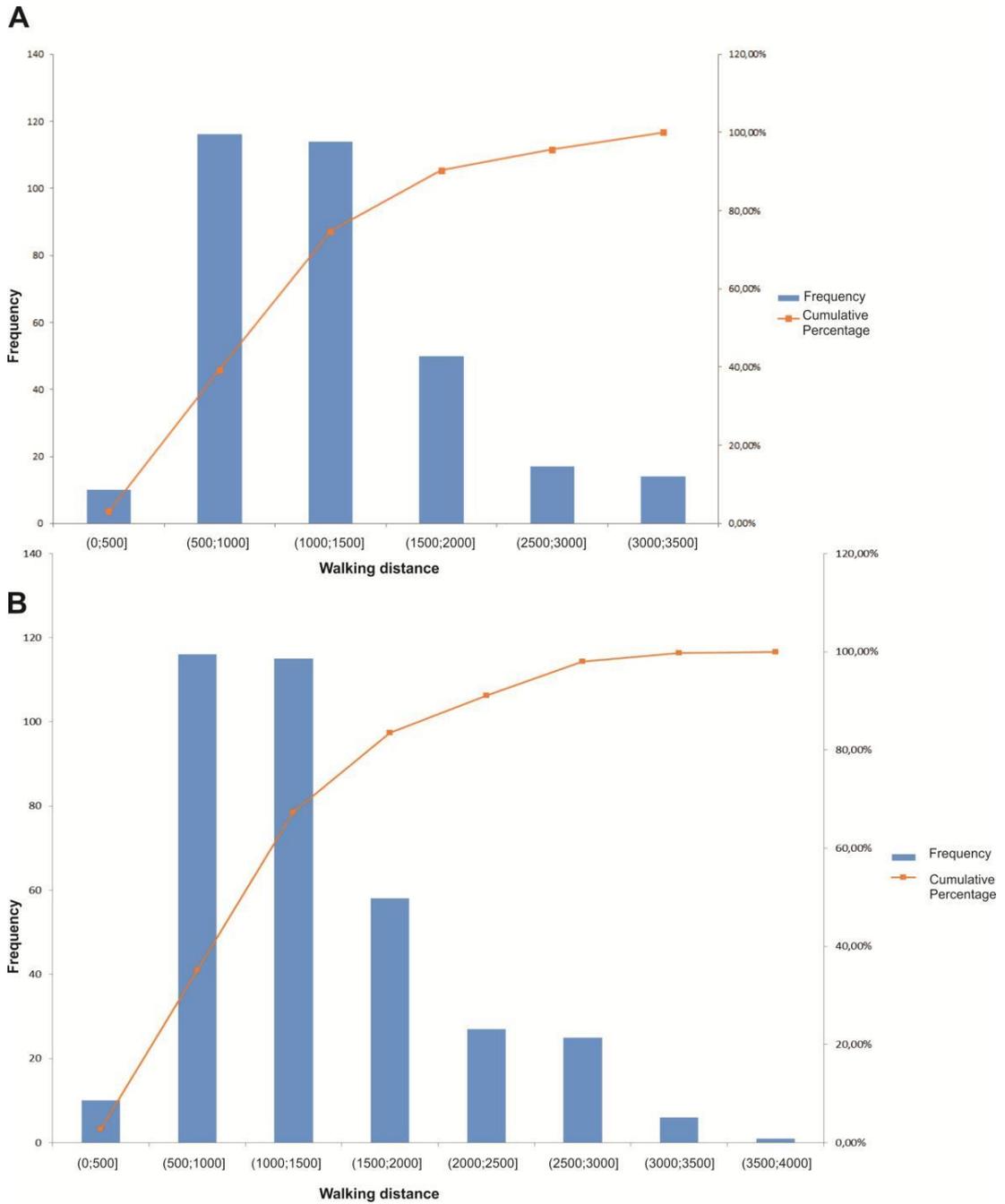


Figura 8 Histograma de distancia caminada – Comparación de configuraciones

6. CONCLUSIONES

Las herramientas desarrolladas permiten la evaluación del sistema de transporte público de cualquier ciudad. Además, permiten la comparación entre diversos escenarios, adquiriendo importancia en la planificación del sistema.

Asimismo, leyendo los valores de las métricas obtenidas, se pueden proyectar modificaciones en el trazado de la red de transporte público, así como en la forma de operar de las diferentes líneas.

La optimización de rutas (usando el transporte público) es esencial en el cálculo de métricas que evalúan la performance del sistema. El cálculo de las mismas hace necesario contar con la mejor ruta entre cada uno de los puntos representativos de la ciudad. Esto implica considerar un gran número de variables, poniendo de manifiesto la utilidad de un sistema que permita la extracción y análisis de datos.

Este nuevo enfoque muestra cómo la configuración del sistema de transporte público afecta a las distintas zonas de la ciudad, cuán relevante es una determinada línea y los costos en los que incurren los usuarios, entre otra información importante.

El conjunto de métricas propuestas han mostrado ser sensibles a las modificaciones en el sistema analizado. Además, contar con el conjunto de viajes óptimos (según diversos criterios) permite extraer abundante información, permitiendo la definición de nuevas métricas, según las necesidades del analista.

7. REFERENCIAS

- [1] A. Cardillo, S. Scellato, V. Latora and S. Porta, "Structural properties of planar graphs of urban street patterns", *Physical Review E*, 2006.
- [2] P. Crucitti, V. Latora and S. Porta, "Centrality Measures in Spatial Networks of Urban Streets", *arXiv:physics*, 2005.
- [3] F. Wang, A. Antipova and S. Porta, "Street centrality and land use intensity in Baton Rouge, Louisiana", *Journal of Transport Geography*, 2010.
- [4] S. Porta, P. Crucitti and V. Latora, "The network analysis of urban streets: A dual approach", *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006.
- [5] J. Scheurer and C. Curtis, "Spatial Network Analysis of Multimodal Transport Systems: Developing a Strategic Planning Tool to Assess the Congruence of Movement and Urban Structure - A Case Study of Perth before and after the Perth-to-Mandurah Railway", *Research Monograph, Curtin University of Technology, Perth*, 2008.
- [6] Y.-Y. Cheng, R. K.-W. Lee, E.-P. Lim and F. Zhu, "DelayFlow Centrality for Identifying Critical Nodes in Transportation Networks", in *International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining*, New York, NY, USA, 2013.
- [7] S. Mishra, T. F. Welch and M. K. Jha, "Performance indicators for public transit connectivity in multi-modal", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2012.
- [8] K. Magzhan and H. M. Jani, "A Review And Evaluations Of Shortest Path Algorithms", *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 2013.
- [9] Municipalidad Ciudad de Santa Fe, "Santa Fe Ciudad - recorridos de colectivos", 2014. [Online]. http://www.santafeciudad.gov.ar/transporte/urbano/lineas_recorrido_urbano.html.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo desean agradecer al Grupo de Estudio en Transporte de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional por la información aportada referida a la descripción de cada recorrido de las diferentes líneas de colectivo de la ciudad de Santa Fe, así como de los valores de las intenciones de viaje entre cada una de las vecinales.