

Vehículo privado vs. Transporte público. Comparación de su operatividad mediante análisis geoestadístico

*Private vehicle vs public transport in comparison of its operation
by geostatistical analysis*

CARLOS FELIPE URAZÁN BONELLS

Ingeniero Civil, doctor en Gestión del Territorio e Infraestructura del Transporte. Docente investigador del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia.

Contacto: *caurazan@unisalle.edu.co*

HUGO ALEXANDER RONDÓN QUINTANA

Ingeniero Civil, doctor en Ingeniería Civil. Docente asociado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Contacto: *harondonq@udistrital.edu.co*

DIEGO ALEXANDER ESCOBAR GARCÍA

Ingeniero Civil, doctor en Gestión del Territorio e Infraestructura del Transporte. Docente investigador del departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia.

Contacto: *daescobarga@unal.edu.co*

Fecha de recepción: 15 de agosto de 2013

Fecha de aceptación: 1 de noviembre de 2013

Clasificación del artículo: investigación

Financiamiento: Universidad de La Salle,
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Palabras clave: accesibilidad, evaluación de impacto, planeación del territorio, infraestructura, GPS.

Key words: Accessibility, impact evaluation, infrastructure, land planning, GPS.

RESUMEN

En esta investigación se reflexiona acerca de la metodología de cálculo que busca conocer la relación entre las condiciones operacionales del modo

transporte público colectivo urbano (TPCU) y el modo vehículo privado (VP). Se evalúan las condiciones de accesibilidad media global ofrecida por la red vial urbana de Manizales para ambos modos de transporte. Actualmente, la red vial está

compuesta por aproximadamente 12.000 arcos y 9.000 nodos; a partir del procesamiento de los datos de operatividad recopilados se estudian y analizan las características de las curvas isócronas para cada modo y se obtienen datos y gráficas comparativas entre ambos.

La metodología de investigación aplicada arroja resultados gráficos valiosos que permiten identificar los sectores de la ciudad que reportan diferencias importantes en la operatividad de los modos. Así mismo, mediante relaciones de los resultados obtenidos con variables como uso del suelo, número de rutas de TPCU o categoría de la red vial, es posible verificar el porqué de una diferencia operativa o concluir sobre la necesidad de mejoramiento de las condiciones de infraestructura para uno u otro modo. El presente artículo muestra las bondades de la metodología, concluye sobre la misma y reflexiona sobre su aplicabilidad en cualquier urbe.

ABSTRACT

This research is centered on the calculation methodology to understand the relationship between

* * *

INTRODUCCIÓN

La accesibilidad se define como una medida de la facilidad de comunicación entre asentamientos humanos o actividades, usando un determinado modo de transporte (Morris *et al.*, 1978; Zhu i Liu, 2004); no obstante, existen diferentes definiciones del término, siendo la más clásica la expresada por Hansen (1959, p. 73): “[...] the potencial of opportunities for interaction”. La accesibilidad es una medida que ha sido poco usada en el medio colombiano, pero es tan representativa que se debe entender como una necesidad secundaria no percibida (Halden, 2011), la cual no es un fin sino un medio para llegar a eventos prioritarios para

the operational conditions of the Urban Collective Public Transport (UCPT) and the private vehicular mode. We evaluate overall average accessibility conditions offered by the urban road network for both modes, in the city of Manizales. Presently, the city’s road network is composed by approximately 12.000 arcs and 9.000 nodes; by processing data on the operational characteristics this network, we analyze the characteristics of the isochronous curves for each mode, and obtain rich comparative graphs for both. The applied research methodology provides graphical results that allow us to identify the specific city sectors reporting significant differences in terms of the operational characteristics of the modes. Likewise, by relating the obtained results with additional variables such as zoning, number of UCPT routes, and road categories, we are able to explain differences between the operational characteristics of the network. Additionally, we conclude with recommendations for the improvement of infrastructure conditions for the pertinent mode. Thus, this article describes the advantages of this methodology, offers a practical example of its application, and reflects upon its replication in any other city.

intereses de los pobladores (atención en salud, educación, empleo, etc.). Esta posee un valor no solo económico sino social, dado que personas y compañías aprecian altos niveles de accesibilidad que se traducen en mejor calidad de vida y desarrollo económico (Gutiérrez, 1998).

Los modelos clásicos de accesibilidad generalmente toman como variables principales la distancia y la atracción entre los nodos que se interconectan en la red (Curl *et al.*, 2011), estudiando el porqué esta es tan susceptible a pequeños cambios. Es posible afirmar que la accesibilidad en un territorio puede ser baja por fallas en la infraestructura vial (Burkey, 2012), y se relacio-

na más con la distancia entre infraestructuras y modos de transporte, con lo cual se busca reducir tiempos de conexión entre distintas zonas en una ciudad (Gutiérrez y Gómez, 1999).

El concepto de accesibilidad en general ha permitido abordar investigaciones en campos del conocimiento, como estudios de localización y prestación de servicios (Calcuttawala, 2006; Park, 2012; Higgs *et al.*, 2013), desarrollo económico (Rietveld y Nijkamp, 1993; Vickerman *et al.*, 1999; Mackinnon *et al.*, 2008), demografía (Kotavaara *et al.*, 2011), análisis de cobertura (Straatemeier, 2008), sostenibilidad (Cheng *et al.*, 2007; Vega, 2011), cohesión social (Schürman, 1999; López *et al.*, 2008), acceso a parques públicos (Wang *et al.*, 2013) y hasta temas relacionados con las redes sociales (Sailer *et al.*, 2012) y el turismo (Kastenholz *et al.*, 2012).

La planificación territorial (regional y urbana) ha dado importancia al concepto de “accesibilidad” durante las últimas cinco décadas; no obstante, su origen se remonta a los años veinte cuando se aplicó en áreas como la teoría de la localización y el planeamiento económico regional (Batty, 2009), y se convirtió así en pieza clave para una mejor planificación de usos del suelo (Kibambe *et al.*, 2013).

Los objetivos en cuanto al transporte de una gran cantidad de países buscan eliminar las diferencias de clases, por medio de mayor acceso a servicios y artículos de primera necesidad (Jones, 2011). Para esto hay que tener en cuenta cómo la evolución del modo de TPCU influye de forma directa en la calidad de vida de los habitantes. Por otra parte, los análisis de accesibilidad son cada vez más importantes al evaluar planes y proyectos de infraestructura (Gutiérrez *et al.*, 2012).

Después de conocer una variedad de medidas de accesibilidad, se han de proponer metodologías que busquen la comparación objetiva y real de diferentes modos de transporte. Cuando se establece que un determinado territorio posee baja

accesibilidad, comparado con ciertos estándares, se requieren análisis que determinen los aspectos críticos como medida para planificar intervenciones. Esto ha ido obteniendo cada día una mayor aceptación (Farrington y Farrington, 2002).

La presente investigación se enfocó en la comparación de las características operativas de la red vial en los modos de transporte TPCU y VP, que circulan por Manizales. Esta ciudad está ubicada en la región centro occidente de Colombia a 2150 m. s. n. m. con 380.000 habitantes aproximadamente, y su desarrollo urbanístico se ha adaptado a una topografía bastante abrupta, lo que le proporciona una estructura urbana no continua.

METODOLOGÍA

La metodología de investigación se compone de cuatro etapas: la primera se relaciona con la generación de la red georreferenciada de infraestructuras del transporte y la obtención de las características operativas de los modos de transporte TPCU y VP; la segunda etapa, con los cálculos de las velocidades de operación promedio de los arcos; la tercera etapa, con el cálculo de la accesibilidad media global ofrecida por la red de infraestructuras; y la cuarta etapa, con la comparación entre las accesibilidades medias globales de los modos estudiados.

La investigación se enmarca dentro del contexto de la teoría de redes, y los análisis se fundamentan en métodos cuantitativos y espaciales. A continuación se presentan los aspectos metodológicos más importantes abordados en la investigación, donde la obtención de la red georreferenciada y de las velocidades de operación de los arcos que soportan la red de TPCU y VP se convierte en pasos fundamentales para aplicar técnicas geoes-tadísticas y comparar la operatividad de ambos modos de transporte mediante la variable “tiempo medio de viaje”.

Georreferenciación de la red de infraestructuras y adquisición de características operativas

Se instalaron equipos GPS en vehículos de TPCU y en vehículos particulares con el fin de almacenar datos de posicionamiento satelital según un intervalo de tiempo predeterminado, y se obtuvo así información básica de la operatividad del vehículo. Los datos de GPS permitieron actualizar y ajustar de una forma más detallada la red de infraestructuras del transporte de la ciudad; información complementada en algunos sectores con fotografías aéreas.

La red vial está compuesta aproximadamente por 12.000 arcos y 9000 nodos, para cada uno de los cuales se relaciona una serie de atributos, como velocidad media de operación en los arcos y el tiempo de recorrido por el camino mínimo entre cada par de nodos. El sistema de TPCU está conformado por 64 rutas operadas por buses, busetas y microbuses y una ruta servida por el sistema de cable aéreo.

Cálculo de velocidades

Para procesar la información se aplicaron diferentes algoritmos de cálculo de acuerdo con el desarrollo del proyecto. La velocidad de operación se determina para cada arco de la red a partir de los tiempos obtenidos mediante GPS. Se analizaron tres parámetros: (1) la velocidad del vehículo cada intervalo de lectura de dato a lo largo de los *i*-ésimos arcos; (2) la velocidad promedio de operación del *i*-ésimo arco, y (3) la velocidad de operación para cada arco *i* de una determinada ruta. Este análisis se convierte en un elemento básico de la planificación territorial, la cual depende no solo de las características topológicas de la red, sino también de sus características operativas, donde la velocidad media de operación es una variable fundamental para el análisis (Herce y

Magrinya, 2002), y de su consecución depende la precisión y veracidad de los resultados obtenidos.

Velocidad instantánea

La velocidad instantánea entre dos puntos 1 y 2 fue obtenida mediante la ecuación (1).

$$v_i = \frac{3.6}{t} \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} \quad (1)$$

Donde v_i = velocidad en km/h; x_1, y_1 = coordenadas del punto 1 en metros; x_2, y_2 = coordenadas del punto 2 en metros; t = intervalo de tiempo en segundos entre dato y dato.

Este parámetro se usa para establecer las variaciones de la velocidad en un arco en particular, para determinar el índice de paradas cuando se obtienen valores iguales a cero y para establecer la duración de estas.

Cálculo de velocidad promedio de un viaje en el arco

Esta velocidad fue obtenida mediante la relación entre la longitud del arco y la diferencia de los tiempos de paso entre el nodo inicial y nodo final de este, aplicando la ecuación (2).

$$v_i^a = 3.6 \frac{l_a}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

Donde v_i^a = velocidad *i* en el arco *a*(km./h); l_a = longitud del arco *a* en metros; t_1 = hora de paso en el nodo inicial; t_2 = hora de paso en el nodo final.

Cálculo de velocidad promedio en el arco para un periodo

Esta velocidad se calcula mediante la aplicación de la ecuación (3). Esta velocidad se calcula para cada arco de la red vial que soporta el TPCU y el

VP, y es usada para establecer las impedancias y a través de esta la matriz de tiempos mínimos.

$$\overline{v}_a = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^a}{n} \quad (3)$$

Donde \overline{v}_a = velocidad promedio de operación del arco a ; n = número de datos de velocidad registrados en el arco a , para un periodo.

Cálculo de la accesibilidad media global

Esta se analizó a partir del vector de tiempo medio de viaje (T_{vi}), el cual representa el tiempo promedio de viaje desde un nodo i hasta los demás nodos de la red. Para el cálculo se utilizó un algoritmo del SIG que permite calcular la menor impedancia (camino mínimo) entre un nodo específico y los demás nodos de la red, conformando una matriz unimodal de impedancias. Mediante esta matriz y conociendo la velocidad de operación promedio de cada arco, se elaboró la matriz de tiempos promedios mínimos de viaje, la cual minimiza el tiempo de viaje entre todos los nodos de la red. Posteriormente, conociendo la velocidad de operación promedio de cada arco, se elaboró la matriz de tiempos promedios mínimos de viaje, en la que se minimiza el tiempo medio de viaje entre todos y cada uno de los nodos que conforman la red en estudio. Una vez determinada la matriz de tiempos promedios mínimos de viaje, se obtuvo el vector de tiempo promedio de viaje aplicando la ecuación (4).

$$\overline{T}_{vi} = \frac{\sum_{j=1}^m t_{vi}}{(n-1)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n ; j = 1, 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

Donde T_{vi} = tiempo de viaje mínimo promedio entre el nodo i y los demás nodos de la red; t_{vi} = tiempo de viaje mínimo entre el nodo i y los demás nodos de la red; n = número de nodos de la red.

El vector de tiempo medio de viaje obtenido ($n \times 1$) se relaciona con las coordenadas geográficas (longitud y latitud) de cada uno de los nodos, con el fin de generar una matriz de orden ($n \times 3$), por medio de la cual se generaron las curvas isócronas de tiempo promedio de viaje para el análisis de la accesibilidad media global. Se usó el método de kriging ordinario con semivariograma lineal como modelo de predicción de los tiempos medios de viaje. Este indicador de accesibilidad tiende a favorecer los puntos ubicados hacia el centro de una red, debido a que los tiempos de viaje desde dichos nodos hacia los demás son menores por su ubicación geográfica.

Se resalta que para el cálculo de la accesibilidad media global en el modo TPCU, se tuvo en cuenta la posición de las paradas de autobús, así como los tiempos de caminata antes de abordar y después del recorrido. El valor obtenido de tiempo medio de viaje corresponde a la suma de las impedancias de los diferentes tiempos sobre cada arco, una parte en TPCU y otra caminando. En los paraderos se considera una demora generada por la espera del vehículo, como una función de la frecuencia de la ruta, en el descenso del sistema de TPCU no se considera ninguna demora. Se calcula la red de caminos mínimos para el sistema de TPCU de todos los nodos contra todos los nodos, matriz que permite generar los modelos de accesibilidad necesarios para la comparación con el modo vehículo particular.

Para la aplicación del análisis geoestadístico se debe definir cuál método de interpolación se va a usar, y para esto es necesario verificar algunos supuestos estadísticos que las variables han de cumplir. El primer supuesto estadístico se basa en verificar la normalidad de los datos, para lo cual se aplica la prueba no paramétrica de Kolmogorov-Smirnov; si el vector de tiempo resulta ser no normal, se realiza una transformación de los vectores por medio del algoritmo Box-Cox. Para el segundo supuesto estadístico se debe verificar la existencia o no de estacionariedad; para ello

se deben realizar gráficos de dispersión entre el vector de tiempo medio de viaje que se esté analizando y la posición geográfica (longitud y latitud, respectivamente), con el fin de establecer cuál es la tendencia que deberá ser removida del modelo de interpolación. El tercer supuesto estadístico considera que la varianza debe ser finita. La variabilidad espacial está relacionada con el cambio de los datos respecto a la distancia y orientación de estos. La medida de la varianza, en geoestadística, es la semivarianza, la cual está definida por la ecuación (5).

$$\gamma(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n} \quad (5)$$

Donde $Z(x)$ = valor de la variable en un sitio x ; $Z(x+h)$ = valor muestral separado del anterior por una distancia h ; h = separación entre valores muestrales; n = número de parejas que se encuentran separadas por dicha distancia h .

Esta función muestra las propiedades de dependencia espacial del proceso y se calcula para diferentes distancias h . A partir de los resultados de esta función se calcula un semivariograma que es la representación gráfica de la semivarianza de los datos respecto a las distancias entre pares de observaciones. A pesar de que no se cumpla la normalidad del vector, luego de aplicarse la transformación Box-Cox, es posible establecer el uso de un método de interpolación estadístico, como por ejemplo el método kriging, si el vector posee homocedasticidad, igualdad en la varianza, es posible aplicar el método.

Finalmente, se determina el método de interpolación por usar (en este caso se usó el método de kriging ordinario con semivariograma esférico) como modelo de predicción de los tiempos medios de viaje. Con el fin de asegurar un resultado estadísticamente confiable, se debe realizar la validación cruzada de los datos. En este proceso se comparan los valores observados con los valores estimados por el modelo de interpolación seleccionado, teniendo en cuenta que con una regresión lineal es posible establecer la adecuada o inadecuada precisión del modelo usado para la predicción de los datos.

Comparación de accesibilidades

A partir de las curvas isócronas de accesibilidad media global para cada modo de transporte, se realiza la comparación entre ambas mediante el *software* Surfer®, el cual aplica técnicas geoestadísticas de interpolación espacial para establecer la relación entre ambos modos de transporte y conocer la variación existente entre usar el modo de TPCU o el modo de VP para todos los sectores de la ciudad.

PRINCIPALES RESULTADOS

En la tabla 1 se observa la longitud de red vial, la velocidad de operación según la categoría de la vía, tanto para el modo TPCU como para el VP, para el año 2009.

Tabla 1. Longitud y velocidad de operación en la red vial según la categoría de la vía, para el TPCU y comparación con la red viaria del vehículo privado (2009)

Categoría de la vía	TPCU			Vehículo privado			% de red viaria en ambos modos de transporte
	Long. (km)	% de la red viaria total	Velocidad promedio (km/h)	Long. (km)	% de la red viaria total	Velocidad promedio (km/h)	
Principal	59,9	10,0	21,6	68,9	11,5	37,9	87,0
Secundaria	43,4	7,3	16,8	56,3	9,4	27,2	77,1
Colectora	66,7	11,1	14,1	100,0	16,7	24,1	66,7

Categoría de la vía	TPCU			Vehículo privado			% de red viaria en ambos modos de transporte
	Long. (km)	% de la red viaria total	Velocidad promedio (km/h)	Long. (km)	% de la red viaria total	Velocidad promedio (km/h)	
Local	34,2	5,7	12,9	372,8	62,3	17,7	9,2
Total	204,2			598,0			

Fuente: elaboración propia.

Se obtuvo que para dicho año existían 204,2 km. de red vial destinada a la operación del TPCU (situación que no ha cambiado para el 2013 año actual). Esto está representado en el 34,1 % de la red viaria total de la ciudad (excluyendo las vías peatonales). El 87% de la categoría viaria principal es de funcionalidad mixta, es decir, soporta ambos modos de transporte; mientras que para el caso de la red viaria local, dicho porcentaje es menor al 10%. Lo anterior concluye que existe un alto porcentaje de vías locales por las cuales podría operar el TPCU, así como sería posible priorizar el uso de algunos corredores viales, que actualmente son mixtos, para especializarlos en un solo modo de transporte. Se resalta que el TPCU operar en mayor proporción por vías colectoras

y principales (32,6% y 29,4% de la red vial de TPCU, respectivamente). La velocidad promedio de operación del TPCU fue de 16,3 km/h, mientras que la del vehículo privado fue de 26,7 km/h. Para ambos modos la mayor velocidad promedio se presenta en vías de categoría principal.

Al analizar la longitud de red viaria por la cual opera el TPCU según diferentes rangos de velocidad promedio de operación, se observa en la tabla 2 que aproximadamente el 42% de esta refiere velocidades menores a 15 km/h; hecho con el cual se encuentra que en el CBD (Central Business District) de la ciudad existe un alto número de arcos que reportan velocidades de operación inferiores a los 10 km/h.

Tabla 2. Longitud y velocidad de operación en la red vial según la categoría de los arcos, para el TPCU, y comparación con la red viaria del vehículo privado (2009)

Categoría de la vía	Velocidad promedio real del TPCU (km/h)					Longitud total (km)	% de la red viaria de TPCU
	< 10	10 - 15	15 - 20	20 - 25	> 25		
	Longitud (km)						
Principal	5,3	5,9	7,4	11,8	29,5	59,9	29,4
Secundaria	8,1	9,8	9,3	7,9	8,3	43,4	21,3
Colectora	16,9	18,2	14,5	9,0	8,0	66,7	32,6
Local	10,2	11,0	7,1	1,3	4,7	34,2	16,7
Total	40,5	44,9	38,3	30,0	50,5	204,2	
% de la red viaria de TPCU	19,8	22,0	18,8	14,7	24,7		

Fuente: elaboración propia.

Lo descrito muestra no solo que la red principal juega un papel primordial para la operación de este modo de transporte, sino que también existe la necesidad de una mayor gestión vehicular en vías secundarias, colectoras y locales con el fin de aumentar la velocidad de operación de este a por lo menos 18 km/h, es decir, dos puntos más.

Para el modo vehículo privado se encontró que los rangos de velocidad promedio de operación en el CBD de la ciudad no poseen una correspondencia directa con la categoría funcional de la vía. Se evidencia claramente una ausencia de gestión vehicular en este sector de la ciudad, el cual no cuenta con corredores viales con una funcionalidad común respecto a su velocidad de operación, situación que impacta directamente los resultados de accesibilidad media global.

Como resultado del análisis comparativo de accesibilidad media global ofrecida por el modo TPCU y el vehículo privado, se observan en la figura 1 las curvas isócronas correspondientes a la red vial de 2009 para ambos modos de transporte.

De forma general, es posible establecer que usando el TPCU las curvas isócronas varían de 30 minutos a 60 minutos. La curva isócrona de 30 minutos (línea gruesa, TPCU, figura 1) cubre un área central de la ciudad, la cual incluye el polo de actividad económica de mayor jerarquía en esta (punto A), así como áreas residenciales de moderada y alta densidad poblacional. Por su parte, todas las zonas periféricas de la ciudad se alcanzan con un tiempo promedio de viaje de hasta 60 minutos (puntos H, I, J, K, L y M), lo cual indica que en promedio el alcanzar dichas áreas desde cualquier punto geográfico de la ciudad tomaría un tiempo de una hora si se realiza el desplazamiento mediante el servicio de TPCU.

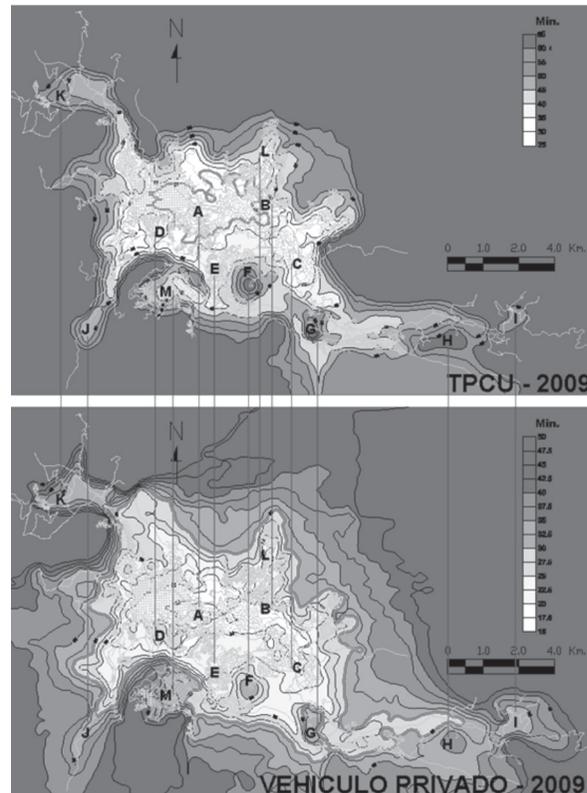


Figura 1. Curvas isócronas de accesibilidad media global ofrecida por el servicio de TPCU y por el vehículo privado (2009). (kriging ordinario con modelo de semivariograma esférico)

Fuente: elaboración propia.

Al comparar las curvas isócronas de ambos modos de transporte, se observa que la curva isócrona de 30 minutos cubre más territorio en vehículo privado que en TPCU (línea gruesa, vehículo privado, figura 1). Esto reitera por qué para la población es más atractivo el uso del modo de transporte privado que el público.

Se observa que al CBD de la ciudad (punto A, figura 1) se llega en vehículo privado en casi la mitad del tiempo que en TPCU. Esto se repite en sectores de uso residencial de estratos medio y alto de la ciudad (puntos B y C). No obstante, hay sectores residenciales de estratos bajos con mayor desequilibrio en inversión de tiempo entre ambos

investigación

modos de transporte (puntos D, E y L). Por lo tanto, se concluye que la inserción de infraestructuras viales en la ciudad ha beneficiado en mayor proporción a los estratos socioeconómicos altos.

Por su parte, los sectores industriales de la ciudad (puntos H e I) y sectores de esparcimiento u ocio (puntos F y G) también refieren un importante desequilibrio en inversión de tiempo al comparar ambos modos de transporte; sin embargo, existen sectores periféricos de la ciudad (puntos J, K y M) donde la diferencia de viajar en uno u otro modo de transporte es menos significativa.

Al realizar un estudio de gradientes de tiempo medio de viaje entre las curvas isócronas de accesibilidad, se observó (figura 2) la relación entre el

tiempo de viaje en vehículo privado y en TPCU, y se identificaron así las áreas de la ciudad que refieren la necesidad de invertir un mayor porcentaje de tiempo de viaje en el modo TPCU.

El sector que refiere un menor desequilibrio al relacionar el tiempo medio de viaje en ambos modos de transporte se encuentra ubicado en el municipio de Villamaría (punto A, línea azul, figura 2). Se tiene entonces que para alcanzar dicho sector se debe invertir hasta un 25% más de tiempo si el desplazamiento se realiza en TPCU. Existen sectores de la ciudad en los cuales se debe invertir hasta un 50% más de tiempo de viaje si se usa el TPCU (sectores encerrados por una línea roja, figura 2); sectores que tienen en común un uso del suelo residencial de estrato medio y, en algunos casos, bajo.

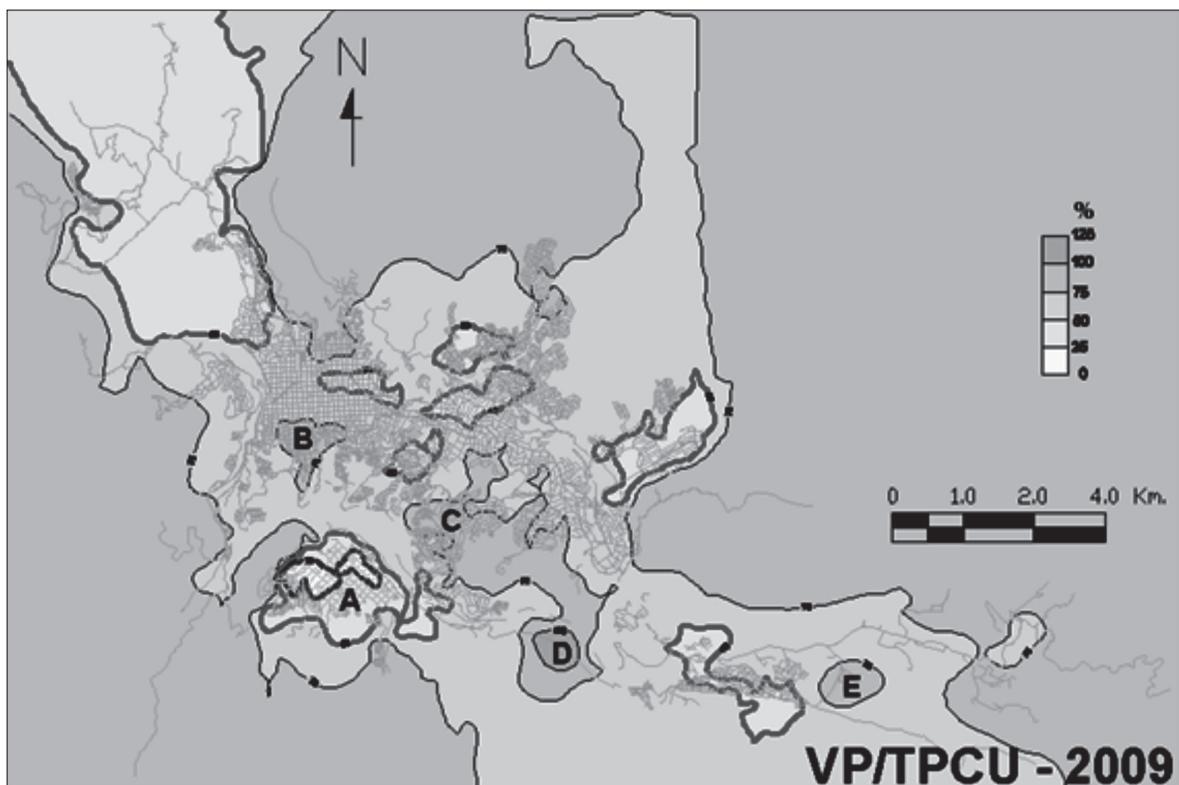


Figura 2. Curvas gradientes de accesibilidad media global entre el servicio de TPCU y el vehículo privado (2009) (kriging ordinario con modelo de semivariograma esférico)

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, existen áreas donde no solo la densidad poblacional es alta y el estrato socioeconómico es bajo, sino que sus habitantes son dependientes del TPCU para los desplazamientos, lo que genera un desequilibrio en los tiempos de viaje entre ambos modos hasta del 75% (puntos B, C y zona norte de la ciudad, figura 2), al igual que un sector de uso industrial y educativo (punto E, figura 2). El sector que refiere un mayor desequilibrio de tiempos de viaje entre ambos modos de transporte (punto D, figura 2) es de uso residencial de estrato alto; allí hay una alta tasa de posesión vehicular y deficiencia en rutas de TPCU.

DISCUSIÓN

En el caso de Bogotá se han venido evidenciando problemas de movilidad, desde mediados del siglo pasado cuando los usuarios del tranvía de la época se quejaban de que dicho modo era lento, ruidoso y siempre se encontraba lleno; y hay percepción peor en la actualidad a pesar de que los modos de transporte son bastante diferentes. Según estudios realizados en los últimos años, se tiene que la velocidad promedio del transporte público ha disminuido de 23,4 km/h a 19,3 km/h entre 2008 y 2010; mientras que para el vehículo privado la velocidad ha disminuido de 30,4 km/h a 23,8 km/h en el mismo periodo. Por su parte, el sistema Transmilenio reporta unas velocidades de operación promedio de 26,2 km/h.

La metodología de investigación propuesta permitiría conocer de una forma bastante certera cuál es la diferencia entre viajar en vehículo privado y transporte público en la ciudad, donde podría ser posible la diferenciación en el uso de los tipos de servicio que presta el transporte masivo (expresos, ruta fácil, alimentadores).

Es claro entonces que con un adecuado trabajo de campo se pueden obtener las velocidades de operación de los diferentes arcos en ambos modos de transporte, lo que permitiría construir curvas

isócronas de accesibilidad media global y compararlas entre sí. Esto lograría dar a conocer los sectores de la ciudad más beneficiados al tener uno u otro modo de transporte.

Ahora bien, Bogotá se encuentra desarrollando estudios para la etapa inicial de la primera línea de metro (PLM), a partir de los estudios realizados por las firmas Sener (España), Metro de Barcelona y Steer Davies Gleave (Inglaterra). Los estudios basan la necesidad de este sistema de transporte solamente en modelos de demanda. El estudio de la firma Steer Davies afirma que no existen en el ámbito nacional valores de referencia de ahorro en tiempos medios de viaje que puedan ser aplicados a un análisis detallado de la relación costo-beneficio de implantar un sistema de transporte tipo metro; así mismo, afirma claramente que a una mayor velocidad promedio del transporte público, se tendrá una mayor probabilidad de cautivar pasajeros, ya que se tendrían mayores ahorros de tiempo (Steer Davies Gleave; 2011). Adicionalmente, el estudio afirma que una de las variables operacionales de la PLM es la velocidad comercial, para la cual realizan un análisis de sensibilidad respecto a la demanda esperada, con el cual se encuentra que si se aumenta la velocidad comercial habría un aumento importante en el número de embarques debido a la mayor atracción del sistema por ofrecer menores tiempos de recorrido. La velocidad comercial de la PLM la establecen en 30,24 km/h con una velocidad máxima de servicio de hasta 80 km/h en recta horizontal (Unión Temporal Grupo Consultor Primera Línea Metro de Bogotá, 2010).

CONCLUSIONES

La investigación arroja resultados gráficos muy valiosos que permiten identificar las zonas de la ciudad que refieren un mayor desequilibrio de tiempos de viaje entre ambos modos de transporte. Estas zonas refieren un uso residencial de estrato bajo, donde su población depende amplia-

mente del TPCU para poder realizar sus desplazamientos.

Existe un alto porcentaje de vías locales que deberían ser usadas para operar el TPCU, así como sería posible el priorizar el uso de algunos corredores viales, que actualmente son mixtos, para especializarlos en un solo modo de transporte. Más del 50% de la longitud de la red viaria por la cual opera el modo TPCU pertenece a vías categorizadas como principales y secundarias, y se encontró que un alto porcentaje de la longitud de la red principal refiere velocidades de operación superiores a 20 km/h, mientras que para las otras categorías viales, la mayor parte de su longitud refiere velocidades de operación menores a los 15 km/h. A pesar de que la red principal es fundamental en la operación del TPCU, es importante la gestión en vías secundarias, colectoras y locales con el fin de aumentar la velocidad de operación al menos hasta 18 km/h. Se concluye que es de vital importancia mejorar las condiciones de operación del TPCU e implementar políticas que desincentiven el uso del vehículo particular, para redundar así en una movilidad más equitativa.

Existen variables que influyen de forma directa en el problema de la movilidad, como son el aumento exponencial del número de vehículos automotores, prestación deficiente del transporte público, la no integración de los modos de trans-

porte existentes, la falta de cultura ciudadana, la ausencia de control y gestión, la errada planificación urbana y la aplicación de deficientes políticas públicas.

TRABAJO FUTURO

Se han encontrado trabajos investigativos en Bogotá que abordan el tema de la velocidad de operación; uno de ellos se centra en la determinación de las velocidades de operación de vehículos particulares en los carriles paralelos al sistema de transporte masivo (Rincón *et al.*, 2011); otro estudio se enfoca en proponer un sistema de gestión y control de tráfico basado en la recolección de las velocidades de operación del transporte tipotaxi (Bravo *et al.*, 2013). Con la metodología descrita, es posible conocer las características de accesibilidad que la red viaria actual ofrece a los habitantes de Bogotá en los diferentes modos de transporte y establecer el verdadero impacto de insertar la PLM u otra infraestructura del transporte, estableciendo los sectores de la ciudad que se beneficiarían con la inserción de un modo en particular. Algunos análisis de accesibilidad basados en la operatividad de los modos de transporte han sido objeto de investigación (Cao y Li, 2012; Escobar y García, 2012) y han demostrado que en Bogotá sería totalmente viable aplicar una investigación similar.

REFERENCIAS

- Batty, M. (2009). Accessibility: in search of a unified theory. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 36, 191-194.
- Bravo, G. *et al.* (agosto, 2013). Retos tecnológicos para medir el tráfico en Bogotá mediante GPS y comunicación celular. *Revista de Ingeniería*, 38, 45-50.
- Burkey, M. (2012). Decomposing geographic accessibility into component parts: methods and an application to hospitals. *Annals of Regional Science*, 48 (3), pp. 783-800 *Forthcoming*.
- Calcuttawala, Z. (2006). Landscapes of information and consumption: Allocation analysis of public libraries in Calcutta. En E. D. Garten, D. E. Williams and J. M. Nyce (Eds.),

- Advances in Library Administration and Organization*, volumen 24 (pp. 319-388). Emerald Group Publishing Limited, Bristol, UK.
- Cao, X. and Li, L. (July, 2012). Accessibility distribution impact of intercity rail transit development on Pearl River Delta region in China. En *12th International Conference of Transportation Professionals*, Beijing, China.
- Cheng, J., Bertolini, L. and Clercq, F. (2007). Measuring Sustainable Accessibility. *Transportation research Board: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 16-25.
- Curl, A., Nelson, J. and Anable, J. (2011). Does Accessibility Planning address what matters? *Transportation Business & Management*, 2, 3-11.
- Escobar, D. y Garcia, F. (July, 2012). Territorial accessibility analysis as a key variable for diagnosis of urban mobility: A case study Manizales (Colombia). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 48(0), 1385-1394.
- Farrington, J. and Farrington, C. (2005). Rural accessibility, social inclusion and social justice: towards conceptualization. *Journal of Transport Geography*, 13(1), 1-12.
- Gutiérrez, J., Condeco-Melhorado, A. and Martín, J. (2012). Using Accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment. *Journal of Transport Geography*, 18, 141-152.
- Gutiérrez, J. and Gómez, G. (1999). The impact of orbital motorways on intra-metropolitan accessibility: the case of Madrid's M-40. *Journal of Transport Geography*, 7 (1), 1-15.
- Gutierrez, J. (1998). Redes, espacio y tiempo. *Anales de geografía de la Universidad Complutense*, 18, 65-86.
- Halden, D. (2011). The use and abuse of accessibility measures in UK passenger transport planning. *Transportation Business & Management*, 2, 12-19.
- Hansen, W. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25 (2), 73-76.
- Herce, M. y Magrinya, F. (2002). *La Ingeniería en la evolución de la Urbanística*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Higgs, G., Langford, M. and Fry, R. (2013). Investigating variations in the provision of digital services in public libraries using network-based GIS models. *Library & Information Science Research*, 35(1), 24-32.
- Jones, P. (2011). Developing and applying interactive visual tools to enhance stakeholder engagement in accessibility planning for mobility disadvantaged groups. *Transportation Business & Management*, 2, 29-41.
- Kastenholz, E., Eusébio, C., Figueiredo, E. and Lima, J. (2012). Accessibility as competitive advantage of a tourism destination: The case of Lousã. In K. F. Hyde, C. Ryan and A. G. Woodside (Eds.), *Field Guide to Case Study Research in Tourism, Hospitality and Leisure*. volume 6 (pp. 369-385). Emerald Group Publishing Limited, Bristol, UK.
- Kibambe, J. P., Radoux, J. and Defourny, P. (2013). Multimodal accessibility modeling from coarse transportation networks in Africa. *International Journal of Geographical Information Science*. 27(5), 1005-1022.
- Kotavaara, O., Antikainen, H. and Rusanen, J. (2011). Population change and accessibility by road and rail networks: GIS and statistical approach to Finland 1970-2007. *Journal of Transport Geography*, 19(4), 926-935.

- López, E., Gutierrez, J. and Gómez, G. (2008). Measuring regional cohesion effects of large-scale transport infrastructure investment: An accessibility approach. *European Planning Studies*, 16(2), 277-301.
- Mackinnon, D., Pirie, G. and Gather, M. (2008). Transport and economic development. In R. Knowles, J. Shaw, and I. Docherty(eds.), *Transport Geographies: Mobilities, flows and spaces* (pp. 10-28). Oxford: Blackwell Publishers.
- Morris, J., Dumble, P. and Wigan, M. (1978). Accessibility indicators in transport planning. *Transportation Research, A.*, 13, 91-109.
- Park, S. (2012). Measuring public library accessibility: a case study using GIS., *Library & Information Science Research*, 34 (1), 13-21.
- Rietveld, P. y Nijkamp, P. (1993). Transport and regional development. In J. Polak and A. Heertje (Eds.), *European Transport Economics, European Conference of Ministers of Transport (ECMT)*. Oxford: Blackwell Publishers.
- Rincón, M., Vargas, W., González, C., Chala, J. y Rivas, M. (2011). Análisis de las velocidades de operación en los carriles mixtos de las troncales del transporte masivo en Bogotá. Hacia una propuesta de aumento de la velocidad máxima permitida. *Revista Azimut*, 47-55, 3.
- Sailer, K., Marmot, A. and Penn, A. (september, 2012). Spatial Configuration, Organisational Change and Academic Networks. *ASNA 2012. Conference for 'Applied Social Network Analysis'*, Zürich, Switzerland.
- Schürmann, C., Spiekermann, K. and Wegener, M. (1999). Accessibility indicators. Dortmund. *BerichteausdemInstitutfürRaumplanung*, 39.
- Steer Davies Gleave (2011). Revisión, actualización y calibración del modelo de transporte de cuatro (4) etapas de Bogotá y la región capital. Informe 3.
- Straatemeier, T. (2008). How to plan for regional accessibility?, *Transport Policy*, 15 (2), 127-137.
- Unión Temporal Grupo Consultor Primera Línea Metro de Bogotá. (2010). Diseño Conceptual de la red de transporte masivo metro y diseño operacional, Dimensionamiento legal y financiero de la primera línea del metro en el marco del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) para la ciudad de Bogotá. Producto N° 25. Documento de Diseño Operacional de la PLM. MB-GC-ME-0025.
- Vega, A. (2011). A multi-modal approach to sustainable accessibility in Galway. *Regional Insights*, 2(2), 15-17.
- Vickerman, R., Spiekermann, K. and Wegener, M. (1999). Accessibility and economic development in Europe. *Regional Studies*, 33(1), 1-15.
- Wang, D., Brown, G. and Mateo-Babiano, I. (august, 2013). Beyond Proximity: An integrated model of Accessibility for Public Parks. *Asian Journal of Social Sciences & Humanities*, 2(3), 486-498.
- Zhu, X. and Liu, S. (2004). Analysis of the impact of the MRT system on accesibility in Singapore using an integrated GIS tool. *Journal of Transport Geography*, 4 (12), 89-101.