

Accesibilidad territorial urbana ofrecida por la red de transmilenio según condición socioeconómica. Caso Bogotá (Colombia)

Urban territorial accessibility offered by the transmilenio network according to socioeconomic condition. Bogotá case

CORTÉS, Valeria¹
URAZÁN, Carlos F.²
ESCOBAR, Diego A.³

Resumen

Esta investigación tiene como objeto evaluar a través del modelo de accesibilidad media global el actual sistema de rutas troncales y alimentadoras del transporte público de la ciudad de Bogotá. Así mismo, evaluar escenarios futuros en los que la infraestructura es mejorada y nuevas rutas son implementadas. Adicionalmente, evaluar el impacto generado a los usuarios por los escenarios futuros, prestando especial atención a la variable de ingreso socioeconómico dada la inequidad presente en el acceso al transporte.

Palabras clave: accesibilidad, movilidad, transporte público, equidad social.

Abstract

This research has the objective of evaluating, through the global average accessibility model, the current system of trunk and feeder routes of public transport in the city of Bogotá. Likewise, to evaluate future scenarios in which the infrastructure is improved, and new routes are implemented. Additionally, evaluate the impact generated to users by future scenarios, paying special attention to the variable of socioeconomic income given the present inequity in access to transportation.

keywords: accessibility, mobility, public transport, social equity

1. Introducción

Los objetivos en cuanto al transporte de una gran cantidad de países buscan eliminar las diferencias entre los usuarios y el transporte público urbano influye de forma directa en la calidad de vida de los habitantes (Hine, 2009). Por otra parte, los análisis de accesibilidad son cada vez más importantes al evaluar planes y proyectos de infraestructura (Escobar & Urazán, 2014). Existen varias definiciones de accesibilidad en el ámbito del transporte (Hansen, 1959; Geurs, 2006; Geurs & Van Wee, 2004), por lo tanto, es necesario aclarar que la que se acota al

¹ Ingeniera Civil, M.Cs. en Ingeniería de Transporte. Universidad Nacional de Colombia. vcortesci@unal.edu.co

² PhD en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte. Universidad de la Salle, Bogotá. (email: caurazan@unisalle.edu.co)

³ PhD en Gestión del Territorio e Infraestructuras del Transporte. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil, Grupo de investigación en Movilidad Sostenible. Campus La Nubia, Bloque S2-208, Carrera 37 con Calle 94, Manizales, 170003, Colombia. (email: daescobarga@unal.edu.co)

presente estudio corresponde al grado de conexión que tiene toda red y refleja el efecto que sobre la movilidad presentaría un conjunto de intervenciones infraestructurales.

La organización del transporte en Bogotá ha sido insatisfactoria por mucho tiempo (Villalobos & Celis, 2013), las últimas alcaldías han tomado grandes riesgos políticos para reformarla, ya que todos han aceptado que el transporte es probablemente el tema más importante y controversial que cada alcalde debe afrontar (Gilbert & Garcés, 2008). No cabe duda de que Transmilenio es un gran avance en las reformas de transporte, ha reducido la contaminación y la congestión a lo largo de las troncales principales, aunque en la hora pico los viajes son lentos y no confortables (Gilbert & Garcés, 2008). A esto se le suma que la ciudadanía está insatisfecha con la calidad del servicio: apenas 19% reporta estar satisfecho con el transporte troncal, 32% con el zonal y 43% con el colectivo tradicional (SDG, 2014). Hay diferentes problemas relacionados con la integración, cobertura, frecuencia, informalidad, accesibilidad, infraestructura, comunicación al usuario, congestión, cultura de los actores y seguridad personal (Peñalosa, 2016).

Por lo tanto, la presente investigación tiene como objeto comparar la accesibilidad media global de la red troncal actual de Transmilenio con la red proyectada para los usuarios del sistema categorizados por estrato socioeconómico, en función de la política pública de transporte planteada por la actual administración distrital. Es decir, que se van a determinar los porcentajes de ahorro en tiempo promedio de viaje que tienen los usuarios según el estrato, al implementar nuevas rutas troncales en la red analizada, todo esto a través de la metodología de accesibilidad media global. Para cumplir con el objeto planteado se van a analizar las propuestas de trazado a futuro de la red troncal de Transmilenio de la actual Alcaldía. Luego se procederá a calcular el tiempo promedio de viaje (isócronas) en los diferentes puntos de la ciudad, por medio de modelos geoestadísticos, tanto para la red actual como para la red futura. También será necesario determinar el ahorro en tiempo promedio de viaje que tienen los usuarios caracterizados por su estrato socioeconómico con la incorporación de las troncales proyectadas. A partir de esto, determinar si la red troncal proyectada o futura cumple con la política pública distrital en términos de mejoras en las condiciones de accesibilidad territorial urbana ofrecida por la red de transportes y, finalmente, realizar un análisis histórico de asequibilidad al sistema troncal en función del comportamiento de la tarifa al usuario, respecto del salario mínimo.

El proyecto se realizará para el escenario actual (2017) de la red troncal y de alimentadores de Transmilenio, y también para una red futura, que según el Distrito serán las troncales de la Carrera Séptima, la Avenida Boyacá, la Avenida Ciudad de Cali y la Carrera 68. Esta metodología es novedosa en el país, con desarrollos importantes en la región del eje cafetero (Escobar & García, 2011; 2012; Escobar et al, 2015; 2016; Urazán et al, 2013; Younes et al., 2016). Sin embargo, es el primer estudio con este modelo desarrollado en la ciudad de Bogotá, por lo tanto, presenta resultados novedosos que son una herramienta de planificación importante para la ciudad en materia de movilidad, además, abre las puertas para desarrollar otro tipo de estudios relacionados con la metodología en la ciudad y en la región. Este tipo de análisis es un apoyo técnico que muestra un panorama general de las condiciones de accesibilidad de un territorio (Fransen et al., 2015; Geurs et al., 2016), que en cualquier momento puede apoyar la toma de decisiones respecto a modificaciones que se deseen realizar a la red vial y sobre todo para establecer en qué áreas de la ciudad se deben aunar esfuerzos para ofrecer una mejor accesibilidad y aumentar la calidad de vida de los habitantes (Kunieda & Gauthier, 2007; Wang et al., 2015).

2. Metodología

La metodología de investigación se compone de seis etapas consecutivas: Adquisición de la información; Georeferenciación de la red; Cálculo de velocidades de operación sobre los arcos que componen la red; Cálculo de la accesibilidad media global; Cálculo del porcentaje de ahorro; Análisis de cobertura global.

2.1. Actualización y validación de la red de infraestructuras del transporte

Para obtener la información necesaria para aplicar la metodología se utilizaron fuentes primarias y secundarias (Alcaldía de Bogotá, 2011; SITP, 2018). Por un lado, la información primaria fue suministrada por Transmilenio S.A y el IDECA (Infraestructura de datos especiales del Distrito Capital), los datos suministrados corresponden a: Localización de paraderos de los alimentadores y estaciones del componente troncal; Velocidades de operación de troncales y alimentadores en la hora pico de la mañana; Trazado de rutas de alimentadores y troncales actuales; Trazado de troncales futuras: Calle 68, Av. Ciudad de Cali, Carrera 7, Av. Boyacá; Malla vial integral de Bogotá; Mapa de distribución de estratos socioeconómicos de Bogotá. Por otro lado, la información secundaria fue utilizada para validar los datos suministrados por las entidades oficiales, para tener una confiabilidad en los datos arrojados por el trabajo. Por lo tanto, se realizó la toma de información con GPS en todas las rutas alimentadoras del sistema de TransMilenio S.A. para corroborar las velocidades de operación en la hora pico de la mañana y el trazado de las rutas y adicionalmente, la información también fue validada a partir de aplicaciones tecnológicas de transporte público de Bogotá, en donde se determinaron las velocidades de las diferentes rutas del componente troncal del sistema en la hora pico.

2.2. Georeferenciación de la red

La red de infraestructura evaluada se compone de 1.800 arcos, que son segmentos de la red y 1.231 nodos, que corresponde a las estaciones y paraderos del sistema de transporte público evaluado. El modelo tiene todas las rutas de troncales y alimentadores actuales y futuras del sistema. Adicionalmente, tiene un componente de red peatonal con un radio de acceso de 700 metros alrededor de los paraderos y estaciones del sistema. Cada tramo posee características físicas propias asociadas con la pendiente, longitud, sección transversal, etc., que pueden ser utilizadas para calcular la velocidad promedio de los vehículos que circulan por ellos. De igual manera los nodos pueden poseer muchas características y/o restricciones, convirtiéndose generalmente en un referente o hito para los diferentes análisis. Finalmente, se cuenta con la información estratos socioeconómicos de los bogotanos sobre toda la red evaluada.

2.3. Cálculo de las velocidades de operación

El procesamiento de toda la información requiere de la aplicación de diferentes cálculos de acuerdo con el desarrollo del proyecto, colocándose especial énfasis en el análisis de la velocidad de operación, dado que esta variable determina el comportamiento de la red (Melhorado et al., 2016). La velocidad de operación se determinó para cada arco de la red a partir de los datos de tiempo obtenidos en forma continua mediante los equipos GPS y la información primaria. Se analizaron tres parámetros: la velocidad del vehículo en cada intervalo de lectura de dato a lo largo de los i -ésimos arcos; la velocidad promedio de operación del i -ésimo arco; la velocidad de operación para cada arco i de una determinada ruta. La velocidad de operación por intervalo entre dos puntos 1 y 2 fue obtenida mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

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

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 y t = intervalo de tiempo en segundos entre dato y dato. Este parámetro es útil para establecer las variaciones de la velocidad en un arco en particular y para determinar la rata de paradas cuando se obtienen valores iguales a cero.

El segundo parámetro es la velocidad promedio de viaje en un arco, la cual 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 del mismo, mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$V_i^a = 3.6 \frac{la}{t_2 - t_1}$$

Donde, V_i^a =velocidad i en el arco a (km/h); la =longitud del arco a en metros; t_1 = tiempo de paso en el nodo inicial y t_2 =tiempo de paso en el nodo final.

Finalmente, la velocidad promedio en el arco para un período de tiempo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\overline{v_a} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i^a}{n}$$

Donde, v_a =velocidad promedio de operación del arco a y n =número de datos de velocidad registrados en el arco a , para un periodo de tiempo. Esta velocidad se calculó para cada arco de la red vial, y se usó para establecer las impedancias y para el desarrollo del modelo de predicción de tiempos medios de viaje.

2.4. Cálculo de la accesibilidad media global

La accesibilidad media global se analizó a partir del vector de tiempo medio de viaje (\overline{Tvi}), el cual representa el tiempo promedio de viaje desde el nodo i hasta los demás nodos de la red; este indicador 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. Para el cálculo de dicho indicador, se utilizó un algoritmo del SIG que permite calcular la menor impedancia entre un nodo específico y los demás nodos de la red, conformando una matriz unimodal de impedancias, a través del software ArcMap. A través de 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 (\overline{Tvi}), cuyas entradas se calculan a través de la siguiente ecuación:

$$\overline{Tvi} = \frac{\sum_{j=1}^m tv_j}{(n-1)} \quad i = 1,2,3, \dots, n \quad j = 1,2,3, \dots, m$$

Donde, n =número de nodos de la red; \overline{Tvi} = tiempo de viaje mínimo promedio entre el nodo i y los demás nodos de la red y $\sum_{j=1}^m tv_j$ = sumatoria del tiempo de viaje mínimo entre el nodo i y los demás 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, para cada uno de los escenarios investigados. Para la obtención de las curvas isócronas se usa el software ArcMap, primero fue necesario definir cuál método de interpolación usar, para lo cual se verificaron algunos supuestos estadísticos que las variables han de cumplir.

2.5. Porcentajes de ahorro en tiempo promedio de viaje

Uno de los objetivos del presente trabajo consiste en evaluar cuáles son los porcentajes de ahorro en términos de tiempo promedio de viaje que tiene la red actual a partir de incorporar las troncales proyectadas. Para observar los cambios e impactos generados con las propuestas establecidas en la investigación, se realiza la comparación del tiempo de viaje del escenario futuro con la situación actual para cada uno de los nodos de la red, aplicando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de ahorro} = \frac{(Tv \text{ futuro} - Tv \text{ actual})}{Tv \text{ actual}}$$

Nuevamente se obtendrá una matriz de $n \times 3$ con coordenadas en longitud y latitud, y se puede realizar geoestadística para observar los porcentajes de ahorro en el sistema de información geográfica.

2.6. Análisis de cobertura

El análisis de cobertura espacial se desarrolla superponiendo dos archivos que poseen características geográficas (ubicación), y características descriptivas (datos). Se hace un cruce de la información que se encuentra ubicado en el mismo espacio geográfico, sean puntos, líneas o polígonos, y se busca la relación de los datos de cada archivo. Una vez obtenidos los resultados de las áreas de cobertura, las isócronas de la accesibilidad media global, y las curvas del porcentaje de ahorro, se realiza una superposición de datos geográficos información socioeconómica de la ciudad de Bogotá (estratos socioeconómicos). A partir de los resultados de contrastar dicha información, se crean ojivas para analizar el porcentaje de cobertura para cada estrato socioeconómico de la ciudad.

3. Resultados

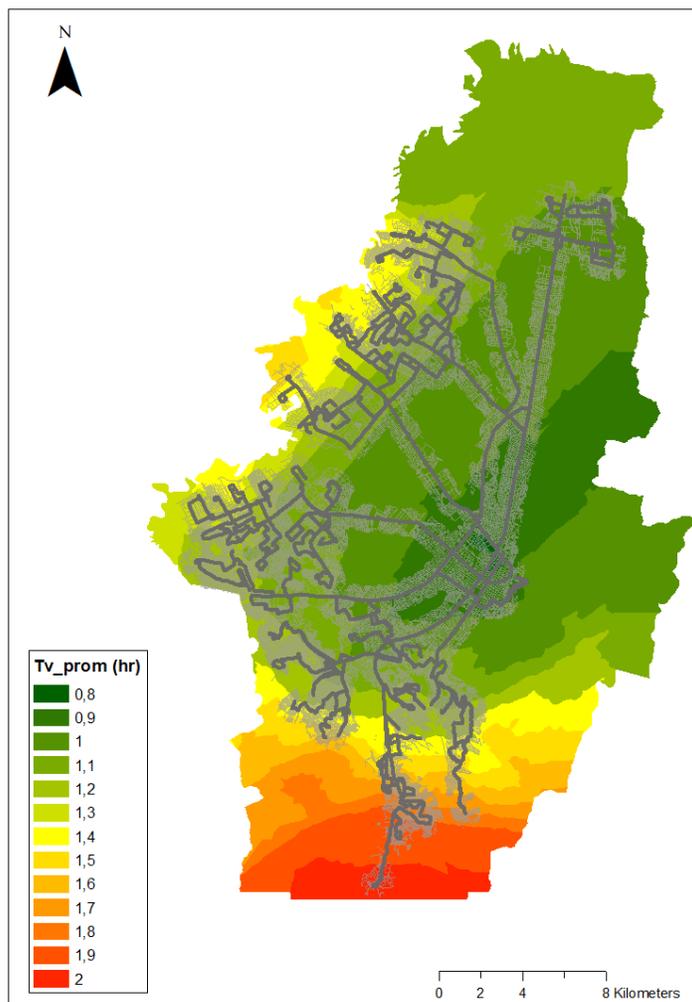
En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos para la red actual, la red con la incorporación de las nuevas rutas y la variación entre los dos escenarios en términos de tiempo promedio de viaje. Se presentan los resultados asociados con el estrato socioeconómico de Bogotá.

3.1. Análisis de accesibilidad media global ofrecida por la red viaria

En la figura 1, se observan las curvas isócronas de accesibilidad media global para el vector de tiempos medios de viaje en la red viaria actual. Se observa que la curva isócrona de menor tiempo es la de 0.8 horas (40 minutos), la cual cubre el sector central de la ciudad de Bogotá, mientras que la de mayor tiempo se encuentra alrededor de 2 horas, localizada en las localidades de Usme y Ciudad Bolívar. Es posible establecer que, dadas las características físicas y operativas de la red actual, en su conjunto, la zona donde se encuentra la red viaria del sistema BRT, está cubierta con curvas de menor tiempo promedio de viaje, por lo tanto, cuentan con más fácil acceso desde cualquier otro nodo de la red analizada. Se debe resaltar, el cambio de tiempo que se observa entre la red troncal y la red de alimentadores, esto se explica, en la medida que las velocidades del BRT son mucho mayores que las de los alimentadores por la exclusividad del carril preferencial. También, es importante observar que hay zonas de alimentadores que presentan tiempos promedio de viaje mucho mayores que otras, esto se explican en la velocidad de cada una de las rutas, por lo tanto, se evidencia la importancia que tiene la toma de información de las variables que son la entrada para el modelo de accesibilidad. Algunas de las principales razones que pueden generar la disminución de velocidades de unas rutas alimentadoras respecto a otras, se encuentran asociadas con la congestión de determinadas zonas, el mal estado de la infraestructura y vías que superan su capacidad. Las curvas isócronas representan un análisis importante, ya que mediante ellas se puede asociar un tiempo promedio de viaje a cada sector geográfico de Bogotá, esto es de gran utilidad pues la interpolación y los métodos geoestadísticos permiten que a partir de conocer los tiempos de viaje en la red de transporte evaluada sea posible conocer el comportamiento en toda el área de análisis y de esta forma asociar estos tiempos a diferentes variables que pueden caracterizar a los usuarios.

En la Tabla 1, se puede observar hay una relación directa entre el estrato y el tiempo promedio de viaje, es decir que a menor estrato mayor tiempo de viaje. Es importante resaltar que más del 70% del área de Bogotá corresponde a poblaciones con estratos entre 1 y 3. Los tiempos promedio de viaje son los mayores en los estratos mencionados. Por ejemplo, el estrato 1 tiene un tiempo promedio de viaje de alrededor de 1 hora y media, mientras que el estrato 6 es de 0.98 horas, es decir, un 37% menor.

Figura 1
 Curvas isócronas de Accesibilidad media global
 en la hora pico ofrecidas por la red actual.



Fuente: Elaboración propia

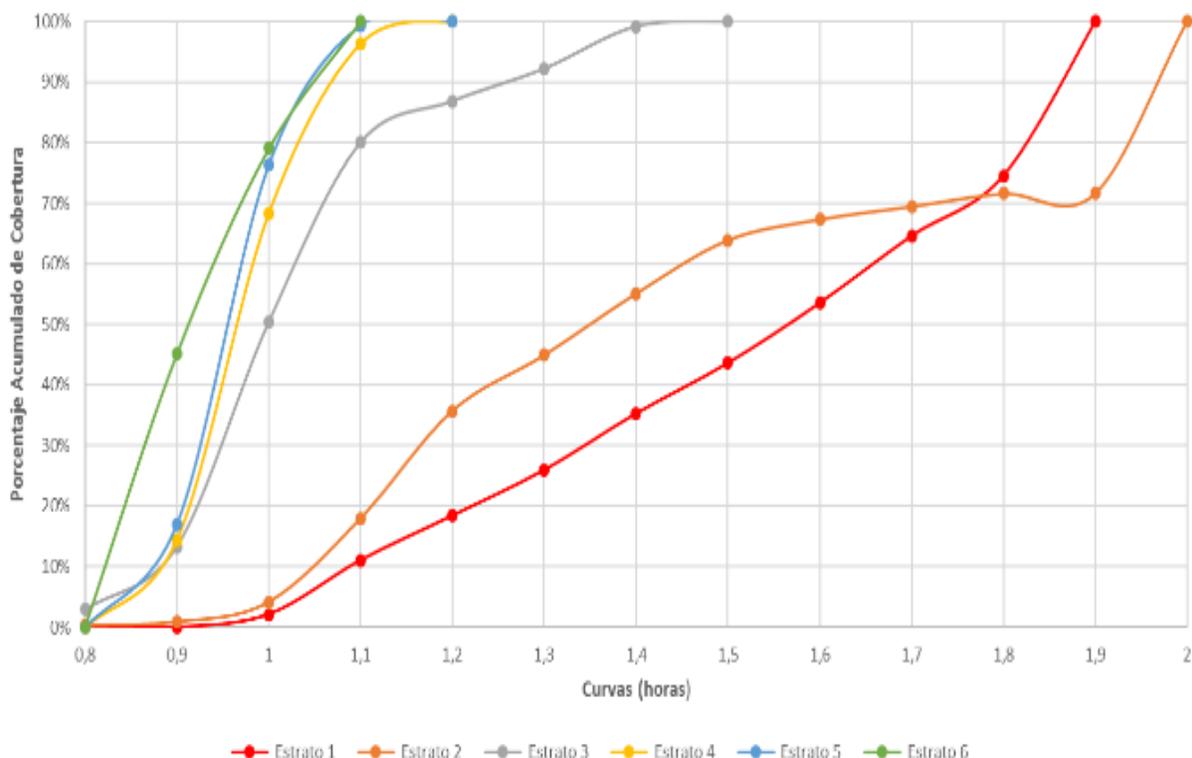
En la figura 2 se puede observar que, en el caso de los estratos socioeconómicos, la población que mayor tiempo invierte en los viajes dentro del sistema de transporte público en el componente troncal y de alimentadores corresponde a los estratos 1 y 2, siendo para el 2 el tiempo más desfavorable. Por otro lado, los estratos 5 y 6 corresponden a los habitantes que menos tiempo deben invertir. El 100% de la población de estrato 4 alcanza la cobertura total en el sistema en 1 hora y 12 minutos. Finalmente, el estrato 3 tiene una cobertura total de su población en 1 hora y 24 minutos. Por lo tanto, es evidente que los estratos más bajos tienen tiempos promedios de viaje mayores. Un aspecto importante a tener en cuenta son las pendientes que se generan en la gráfica, para los estratos más bajos el valor de la pendiente es aproximadamente de 1, mientras que para los altos es de 3. Esto quiere decir que los estratos bajos tienen un rango más amplio de tiempo promedio de viaje que cubre su población respecto a los estratos altos.

Tabla 1
 % Población según ingreso estrato socioeconómico en el área de influencia según la curva isócrona que les cubre en la red actual

% de area correspondiente Curva Isócrona (hr)	Estrato socioeconómico					
	1	2	3	4	5	6
2.0	0.00%	7.87%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.9	4.19%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.8	1.64%	0.59%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.7	1.83%	0.59%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.6	1.64%	0.95%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.5	1.37%	2.44%	0.24%	0.00%	0.00%	0.00%
1.4	1.54%	2.81%	1.99%	0.00%	0.00%	0.00%
1.3	1.24%	2.54%	1.53%	0.00%	0.00%	0.00%
1.2	1.21%	4.92%	1.96%	0.50%	0.05%	0.00%
1.1	1.47%	3.82%	8.47%	3.75%	1.57%	1.47%
1	0.35%	0.91%	10.57%	7.22%	4.05%	2.38%
0.9	0.00%	0.16%	2.97%	1.94%	1.16%	3.18%
0.8	0.00%	0.09%	0.83%	0.00%	0.00%	0.00%
Total Población	16%	28%	29%	13%	7%	7%
Promedio Ponderado	1.57	1.50	1.08	1.02	1.01	0.98

Fuente: Elaboración propia

Figura 2
 Porcentaje de cobertura por estrato socioeconómico. Situación actual



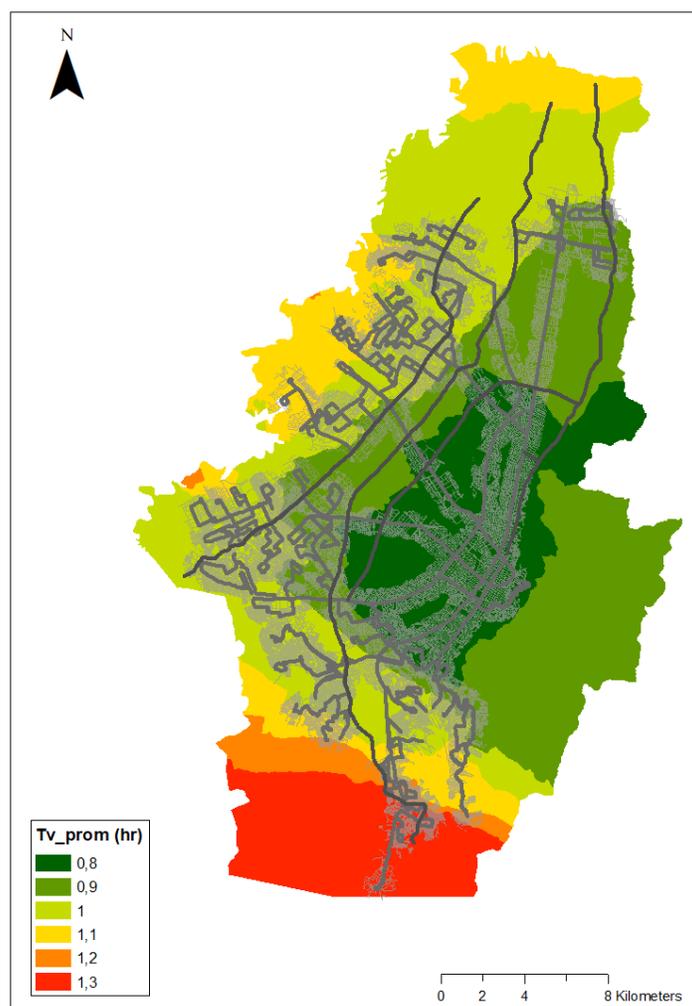
Fuente: Elaboración propia

Al analizar la cobertura que se genera en esta gráfica se puede observar que, los estratos 4, 5 y 6 en términos generales presentan un comportamiento similar en donde hay 0.3 horas (18 minutos) entre el usuario que menos tiempo de viaje tiene con respecto al de mayor. Por otro lado, en el caso del estrato 3 es de 0.7 horas (42 minutos). Finalmente, se encuentra los estratos 1 y 2, que presentan una diferencia de 1.2 horas (72 minutos), es decir, que con respecto a los usuarios de estrato más alto se están demorando 54 minutos más.

3.2. Análisis de accesibilidad media global ofrecida por la red futura

En la figura 3 se aprecian las curvas isócronas de Accesibilidad media global para el escenario futuro, ya se puede observar un escenario en tiempos promedio de viaje muy diferente al escenario actual.

Figura 3
Curvas isócronas de Accesibilidad media global en la hora pico ofrecidas por la red futura.



Fuente: Elaboración propia

No solamente porque la curva isócrona con valor de 0.8 horas cubre mucha más área, sino que también, porque la curva con el tiempo más alto disminuye de 2 horas a 1.3 horas. También se puede observar que las troncales futuras (tono más oscuro) pretenden llegar hasta la periferia de la ciudad, una de las razones que explica la mejoría en los tiempos de viaje. Además, aunque algunas de esas zonas actualmente tienen cobertura del sistema de alimentadores, la velocidad es mucho mayor en el sistema BRT, favoreciendo el tiempo promedio de

viaje para los habitantes de Bogotá. Bajo este análisis, ya se puede ir viendo la importancia de esta metodología de accesibilidad, que permite analizar que modificaciones en tiempos promedios de viaje se generan sobre Bogotá al agregar nuevas troncales a la red. Ahora bien, en la tabla 2, se encuentra el análisis en función de los estratos socioeconómicos. Se puede observar que el escenario futuro presenta un impacto positivo en los tiempos promedios de viaje para todos los estratos en comparación con el actual. En este caso el estrato 1 cuenta con un tiempo promedio de viaje de 1 hora y 9 minutos, mientras que para el estrato 6 es de 57 minutos, es decir un 17% menor.

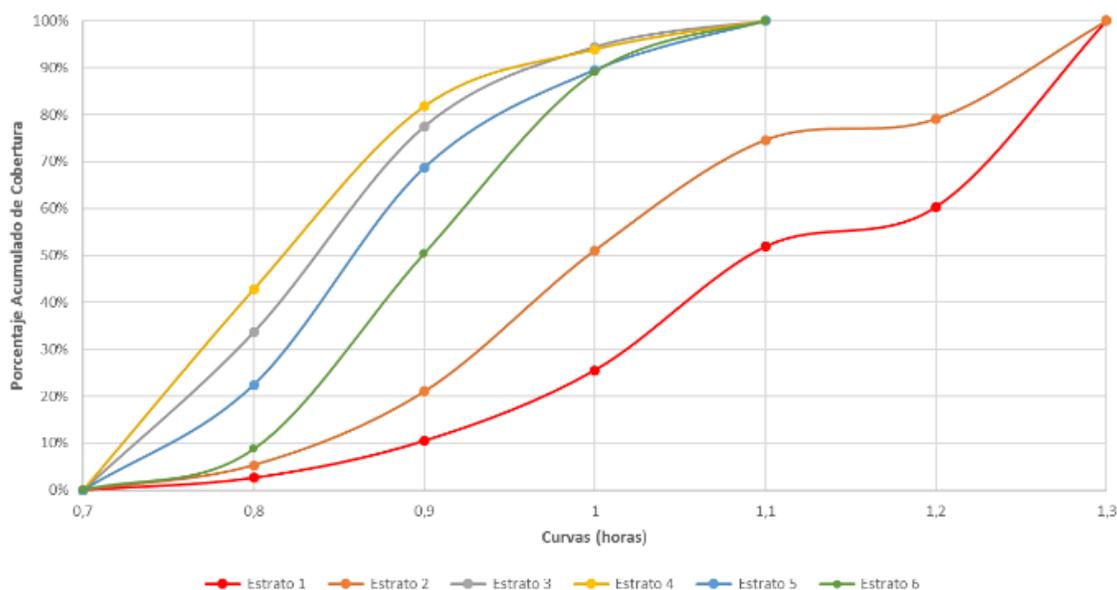
Tabla 2
% Población según estrato socioeconómico en el área de influencia según la curva isócrona que les cubre en la red futura.

% de area correspondiente	Estrato socioeconómico					
	1	2	3	4	5	6
Curva Isócrona (hr)						
1.3	6.79%	5.84%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.2	1.44%	1.25%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
1.1	4.51%	6.57%	1.49%	0.74%	0.74%	0.95%
1	2.58%	8.41%	4.58%	1.47%	1.47%	3.38%
0.9	1.35%	4.39%	11.84%	4.73%	3.27%	3.65%
0.8	0.45%	1.49%	9.09%	5.19%	1.59%	0.76%
Total Población	17%	28%	27%	12%	7%	9%
Promedio Ponderado	1.15	1.07	0.89	0.88	0.92	0.95

Fuente: Elaboración propia

En la figura 4, se encuentra la cobertura del escenario futuro desagregada por estratos socioeconómicos. Se puede observar una distribución más homogénea entre las diferentes condiciones económicas. En este caso, los estratos del 3 al 6, alcanzan la cobertura total de la población en un tiempo de viaje de 1 hora y 6 minutos, mientras que el estrato 1 y 2 invierten más tiempo promedio de viaje (1 hora y 18 minutos) en el sistema evaluado.

Figura 4
Porcentaje de cobertura por estrato socioeconómico. Situación futura



Fuente: Elaboración propia

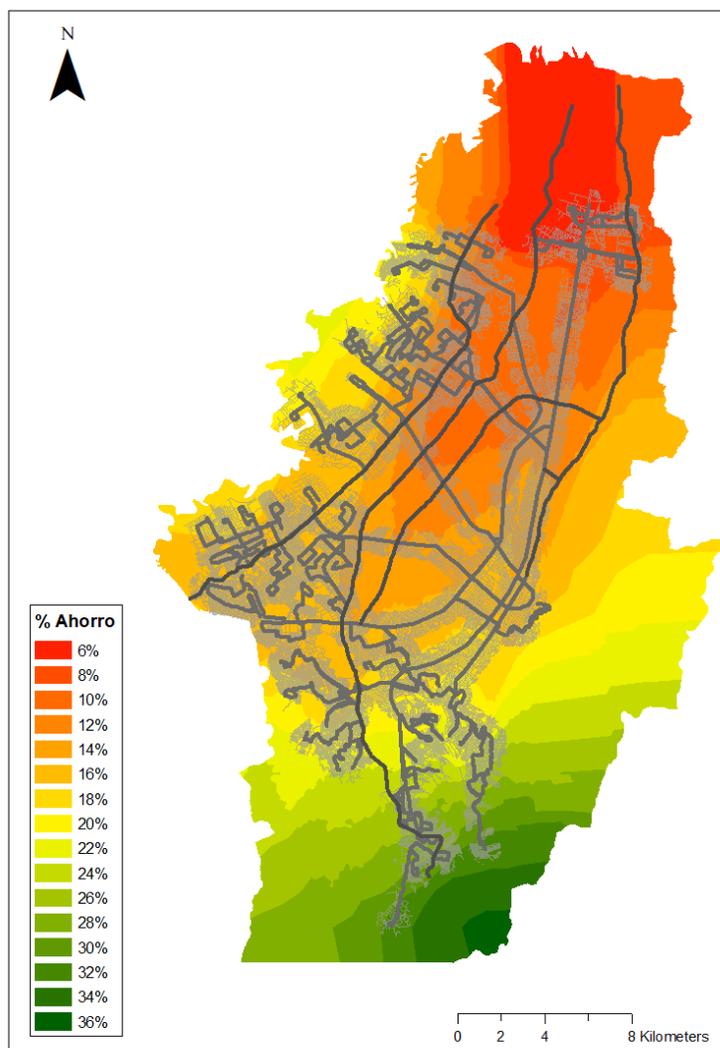
Es importante tener en cuenta que el estrato 3 tiene una ganancia importante al referirse a cobertura, ya que, con la incorporación de las rutas futuras, están mejorando en casi 20 minutos en el tiempo que se requiere para cubrir el total de los usuarios con esta característica económica, igualándose mucho en tiempos a los estratos 4, 5 y 6. Por otro lado, los estratos 1 y 2 también generan ganancias importantes en cuanto a cobertura se refiere.

3.3. Análisis de las curvas gradientes de accesibilidad media global entre la red viaria actual y futura

Las curvas isócronas gradientes de tiempo, se obtienen mediante la diferencia matemática de las curvas isócronas de tiempo medio de viaje para cada uno de los casos, las cuales se calculan mediante cada uno de los vectores de tiempos medios de viaje estudiados, tal cual como se explicó en la metodología. En términos generales se puede observar que, todos los nodos de la red generan ganancias de tiempo con la modificación de la red, es decir, que la ciudad de Bogotá mejora sus tiempos promedio de viaje con la entrada en operación de las nuevas troncales propuestas. En la figura 5, se muestra que hay ganancias de tiempo entre 36% y 6%.

Figura 5

% de ahorro de tiempo entre el escenario actual y el futuro.



Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que las ganancias de tiempo son mayores en las zonas perimetrales de la ciudad. Lo anterior, se debe a que los trazados de las nuevas troncales llegan a puntos en donde actualmente no llegan y por ende las velocidades son mayores, respecto a las ofrecidas por el sistema de alimentadores. El % de tiempo de ahorro,

es la ganancia de tiempo promedios de viaje que tiene la red, al entrar en operación las nuevas troncales. Al hacer una comparación entre los tiempos del escenario actual y el futuro se puede observar que, según el análisis de accesibilidad, en toda la ciudad hay ganancias en tiempo, es decir, que para cualquier punto dentro de Bogotá al incorporar las nuevas troncales va a existir una ganancia en tiempo para los usuarios del sistema. Es evidente que los ahorros más grandes de tiempo se están generando en la periferia de la ciudad, si bien, hay ganancias en la zona central, los usuarios localizados en el perímetro de la ciudad tendrán los mayores beneficios en términos de ahorro de tiempo. Al realizar el análisis de ganancia de tiempo para los usuarios según su estrato socioeconómico, se puede observar en la tabla 3, que, el porcentaje de ahorro de tiempo mayor también se presenta en los estratos más bajos de la ciudad de Bogotá. En el estrato 1, con los cambios en la infraestructura de la red actual se consigue un 25% de ganancia en los tiempos de viaje, mientras que para el estrato 6 está alrededor del 11.8%.

Tabla 3

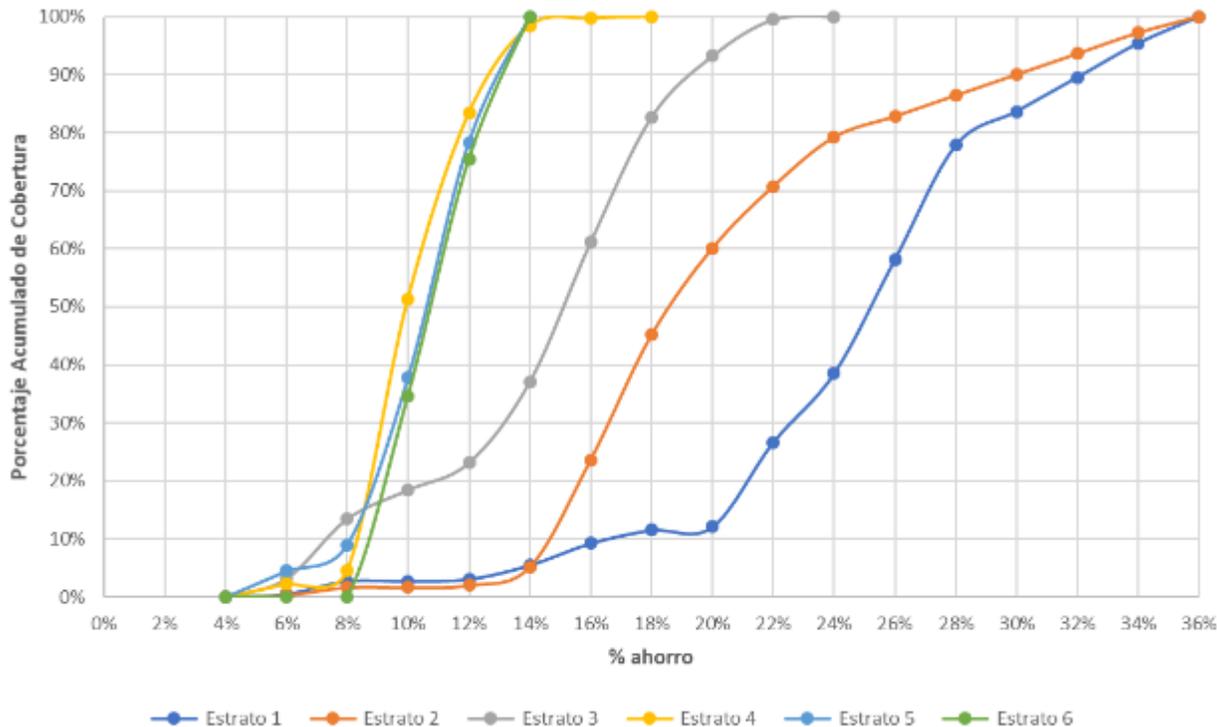
% Población según estrato socioeconómico en el área de influencia según % de ahorro de tiempo.

% de área correspondiente	Estrato socioeconómico					
	1	2	3	4	5	6
% Ahorro						
36%	0.79%	0.79%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
34%	1.01%	1.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
32%	1.01%	1.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
30%	1.01%	1.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
28%	3.39%	1.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
26%	3.39%	1.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
24%	2.04%	2.39%	0.16%	0.00%	0.00%	0.00%
22%	2.51%	3.00%	2.02%	0.00%	0.00%	0.00%
20%	0.10%	4.20%	3.38%	0.00%	0.00%	0.00%
18%	0.39%	6.06%	6.92%	0.03%	0.00%	0.00%
16%	0.65%	5.19%	7.72%	0.14%	0.00%	0.00%
14%	0.41%	0.88%	4.46%	1.62%	1.17%	1.56%
12%	0.06%	0.10%	1.51%	3.44%	2.19%	2.60%
10%	0.00%	0.00%	1.62%	5.04%	1.55%	2.21%
8%	0.38%	0.38%	3.30%	0.24%	0.24%	0.00%
6%	0.10%	0.10%	1.01%	0.24%	0.24%	0.00%
Total Población	17%	28%	32%	11%	5%	6%
Promedio Ponderado	25.65%	21.20%	15.36%	11.21%	11.41%	11.80%

Fuente: elaboración propia

En términos de cobertura en la figura 6, se puede analizar que para el estrato 1 el rango de ganancia de tiempo se encuentra entre el 8% y el 36%, donde más del 50% de la población total de ese estrato tiene ganancias superiores al 24%. Por otro lado, para el estrato 6 los tiempos de ahorro oscilan entre el 8% y el 14%, solamente el 30% de su población tiene ganancias superiores al 12%.

Figura 6
 Porcentaje de cobertura por estratos socioeconómicos. (% ahorro)



Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se pudo establecer la utilidad de la metodología de accesibilidad para planeación de transporte público en una escala general, si bien, no es una herramienta para diseño operacional, si es conveniente para comprobar la viabilidad de un proyecto frente a ciertas características, además presenta importantes análisis geoestadísticos que permiten determinar la precisión de los resultados. Es una metodología que permite la planificación del transporte desde la oferta de infraestructura y no de la demanda de usuarios, como se realiza comúnmente.

A lo largo del presente estudio se hace la evaluación de dos escenarios. En primer lugar, se analizó el Escenario Actual, que comprende la situación de la red de transporte de Bogotá en el 2017, específicamente las rutas troncales y alimentadoras. Al utilizar la metodología de accesibilidad global se pudo observar que los tiempos promedio de viaje menores se encuentran en la zona central de la ciudad, mientras que los mayores están en la periferia. Se puede concluir que no solamente se debe a la localización geográfica de las zonas respecto al centro, sino también, porque muchas de las zonas periféricas son alcanzadas con rutas alimentadoras y estas presentan velocidades mucho más bajas que las de las rutas troncales, por la congestión en la red vial.

Al comparar las curvas isócronas obtenidas con la distribución geográfica de estratos socioeconómicos se concluye que, los tiempos promedio de viaje son mayores para las personas con menos capacidad económica, es decir, menores estratos. Mientras que, aquellos con mejores condiciones económicas presentan los mejores tiempos promedio de viaje.

Por otro lado, se hizo un análisis de la red de transporte de Bogotá incorporando las troncales futuras que plantea la administración de la ciudad. Como primera conclusión al generar las curvas isócronas, se puede observar que

la incorporación de las nuevas rutas troncales genera una ganancia de tiempo para todos los usuarios del sistema, es decir, que los tiempos promedio de viaje disminuyen.

Al desagregar este análisis por estratos socioeconómicos se observa que se sigue manteniendo el mismo patrón que en el Escenario Actual, es decir que, los usuarios con condiciones económicas menos favorables continúan con los tiempos promedio de viaje mayores, si bien disminuyen, el comportamiento se mantiene.

Cuando se hace la comparación de los escenarios evaluados, se determina que la incorporación de las nuevas rutas troncales está generando una mayor ganancia de tiempo promedio de viaje para las personas con estratos más bajos. Si bien, hay ganancias de tiempo en toda la red, porcentualmente los usuarios con condiciones económicas menos favorables están siendo más beneficiados.

Por lo tanto, esta metodología permite concluir que la incorporación de las nuevas rutas troncales planteadas por la actual administración, están mejorando en mayor proporción los tiempos promedio de viaje para los usuarios que hacen parte de los estratos socioeconómicos más bajos, por lo tanto, se disminuye la brecha de tiempos que hay dentro de los diferentes usuarios caracterizados por condiciones socioeconómicas.

4.1. Trabajo futuro

Actualmente en Colombia la metodología utilizada en la presente investigación ha venido siendo desarrollada en el Eje Cafetero. Es importante continuar utilizando este modelo en la ciudad de Bogotá pues resulta una herramienta muy útil de planeación.

Como se mencionó anteriormente tiene la versatilidad de utilizarse para el análisis de diferentes modos de transporte, por lo que se recomienda generar estudios similares para el sistema de bicicletas públicas de la ciudad de Bogotá y analizar la sensibilidad e impactos de modificar las localizaciones de las estaciones del sistema.

Con la consolidación del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá, resulta importante desarrollar un modelo de accesibilidad con la totalidad del sistema y evaluar en función de diferentes características económicas de la población las ventajas o desventajas que hay en tiempos promedios de viaje al modificar alguna de las rutas o componentes del sistema.

Una de las ventajas de este modelo es que sirve para hacer análisis en diferentes escalas, por ejemplo, se recomienda trabajar a nivel regional, se pueden sacar estudios importantes al modificar la red viaria actual con las carreteras proyectadas a futuro de los proyectos nacionales de 4G y analizar las ganancias de tiempo promedio de viaje para determinada región.

También, es importante hacer análisis con otro tipo de variables diferentes a las económicas, se recomienda desarrollar estudios asociados a la localización de los centros de salud y la cobertura que estos tienen en tiempos promedio de viaje a los ciudadanos de Bogotá, e identificar la localización óptima que estos deberían tener.

Existe una cantidad de estudios y proyectos que se pueden desarrollar a partir de las diferentes tipologías de accesibilidad, se recomienda continuar implementando su uso.

Agradecimientos

Los autores agradecen especialmente a los estudiantes pertenecientes al Grupo de investigación en Movilidad Sostenible de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.

Referencias bibliográficas

Alcaldía de Bogotá (2011). Encuesta de percepción sobre las condiciones y calidad del servicio de Transporte Público Colectivo y TransMilenio.

- Escobar, D. A., Cadena, C., & Salas, A. (2015). Cobertura geoespacial de nodos de actividad primaria: Análisis de los aportes a la sostenibilidad urbana mediante un estudio de accesibilidad territorial. *Revista EIA*, (23), 13-27.
- Escobar, D. & Urazán, C. (2014). Accesibilidad territorial: instrumento de planificación urbana y regional. *Revista Tecnura*, Edición especial, 241-253.
- Escobar, D., & García, F. (2011). Impacto de un sistema de transporte tipo Cable sobre la movilidad urbana. Caso Manizales (Colombia). *Avances: Investigación en Ingeniería*, 8(1), 92-98.
- Escobar, D., & García, F. (2012). Análisis de accesibilidad a nodos de actividad en Manizales (Colombia). *Manizales: Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura*.
- Escobar, D. A., Holguín, J. M., & Zuluaga, J. D. (2016). Accesibilidad de los centros de ambulancias y hospitales prestadores del servicio de urgencias y su relación con la inequidad espacial. Caso de estudio Manizales–Colombia. *Revista Espacios. Vol. 37 (20)*.
- Fransen, K., Neutens, T., Farber, S., De Maeyer, P., Deruyter, G., & Witlox, F. (2015). Identifying public transport gaps using time-dependent accessibility levels. *Journal of Transport Geography*, 48, 176-187.
- Geurs, K. (2006). *Accessibility, Land Use and Transport: Accessibility Evaluation of Land-use and Transport Developments and Policy Strategy*. Eburon Uitgeverij BV.
- Geurs, K. T., & Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport geography*, 12(2), 127-140.
- Geurs, K. T., Dentinho, T. P., & Patuelli, R. (2016). Accessibility, equity and efficiency. In *Accessibility, Equity and Efficiency*. Edward Elgar Publishing.
- Gilbert, A., & Garcés, M. T. (2008). *Bogotá: progreso, gobernabilidad y pobreza*. Universidad del Rosario.
- Hansen, W. G. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of planners*, 25(2), 73-76.
- Hine, J. (2009). Transport and social exclusion. In *International Encyclopedia of Human Geography* (pp. 429-434). Elsevier.
- Jones, P., & Lucas, K. (2012). The social consequences of transport decision-making: clarifying concepts, synthesising knowledge and assessing implications. *Journal of transport geography*, 21, 4-16.
- Kunieda, M., & Gauthier, A. (2007). *Sustainable Transport: A sourcebook for policy-makers in developing cities. Module 7a: gender and urban transport: smart and affordable*.
- Lucas, K. (2012). Transport and social exclusion: Where are we now?. *Transport policy*, 20, 105-113.
- Lucas, K., Van Wee, B., & Maat, K. (2016). A method to evaluate equitable accessibility: combining ethical theories and accessibility-based approaches. *Transportation*, 43(3), 473-490.
- Melhorado, A. M. C., Demirel, H., Kompil, M., Navajas, E., & Christidis, P. (2016). The impact of measuring internal travel distances on selfpotentials and accessibility. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 16(2).
- Peñalosa, E. (2016). *Plan de Desarrollo para Bogotá 2016-2020*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.

- SITP (2018). Transmilenio. Obtenido de http://www.sitp.gov.co/Publicaciones/el_sistema/informacion_general
- SDG - Steer Davies & Gleave. (2014). *Cobros por congestión para la ciudad de Bogota D.C.*
- Urazán, C., Rondón, H. & Escobar, D. (2013). Vehículo privado vs. Transporte público. Comparación de su operatividad mediante análisis geoestadístico. *Tecnura*, 100-112.
- Villalobos, M. I., & Celis, M. V. (2013). *Impacto del Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá en la Productividad de la Empresa Transportes Bermúdez SA* (Doctoral dissertation, Universidad del Rosario).
- Wang, Y., Monzon, A., & Di Ciommo, F. (2015). Assessing the accessibility impact of transport policy by a land-use and transport interaction model—The case of Madrid. *Computers, environment and urban systems*, 49, 126-135.
- Younes, C., Escobar, D. A., & Holguín, J. M. (2016). Equidad, accesibilidad y transporte. Aplicación explicativa mediante un análisis de accesibilidad al sector universitario de manizales (Colombia). *Información tecnológica*, 27(3), 107-118.