Condiciones de accesibilidad del transporte automotor privado dada la propuesta de construcción de una infraestructura ciclista

Jorge A. Montoya¹, Diego A. Escobar¹ y Carlos A. Moncada²

(1) Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil, Grupo de investigación en Movilidad Sostenible. Campus La Nubia, Carrera 37 - Calle 94, Bloque S2 – oficina 208, Manizales, 170003, Colombia. (correo-e: jamontoyago@unal.edu.co; daescobarga@unal.edu.co)

(2) Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Programa de Investigación en Tránsito y Transporte – PIT. Ciudad Universitaria edificio 214 oficina 417, Bogotá, 111321, Colombia. (correo-e: camoncadaa@unal.edu.co)

Recibido Feb. 11, 2021; Aceptado Abr. 13, 2021; Versión final May. 18, 2021, Publicado Ago. 2021

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo determinar el impacto en la operatividad del modo de transporte en vehículo privado, dada la propuesta de implementación de la nueva red de ciclorrutas en la ciudad de Manizales (Colombia). Las intervenciones en infraestructura vial, asociadas a la implementación de sistemas de transporte autónomos sostenibles, conllevan un impacto sobre la operatividad de los modos de transporte automotor, debido a los requerimientos estructurales para la seguridad y operación de ambos. La metodología contempla la aplicación de modelos de oferta de infraestructura del transporte como base de evaluación, apoyado en análisis de accesibilidad geográfica, cobertura e impacto geoespacial. Como principal resultado se obtuvo que la propuesta de implementación genera un impacto de hasta el 3% de variación de los tiempos medios de desplazamiento en vehículo privado, con lo cual se concluye que las condiciones de accesibilidad de los usuarios de dicho modo de transporte no cambian significativamente.

Palabras clave: accesibilidad geográfica; infraestructura vial; movilidad privada; modelo; oferta; cobertura

Accessibility conditions of private motorized transport considering the proposal of construction of a cycling infrastructure

Abstract

This research study aims to determine the impact of implementing a new bicycle route network proposal on the operability of private vehicles in the city of Manizales (Colombia). Road infrastructure interventions, associated with the implementation of sustainable autonomous transport systems, affect the operability of automotive transport modes because of structural requirements for both safety and operation. The methodology includes applying transport infrastructure supply models as an evaluation basis. This is supported by geographical accessibility, coverage, and geospatial impact analyses. The results show that implementing the proposal generates up to a 3% variation in average travel times for private vehicles. It is concluded that accessibility conditions do not change significantly for private vehicle users.

Keywords: geographical accessibility; road infrastructure; private mobility; offer model; coverage

INTRODUCCIÓN

La estructuración de sistemas de transporte sostenible, juega un papel de gran importancia en la minimización del impacto ambiental y fortalecimiento de la salud de las comunidades (Singh, et al., 2020). Una forma de impulsar estos sistemas es el promover el trasvase de viajes que se hacen en transporte privado automotor (automóvil y motocicleta) al modo de transporte sostenible, compuesto por viajes activos (caminata, bicicleta), transporte público colectivo, o una combinación de estos (Lättman et al., 2020); no obstante, la implementación de estos modos activos de transporte, involucra diversas intervenciones y modificaciones en la red de infraestructuras, que a su vez, afectan la operatividad de los sistemas de transporte.

Es conocido en el marco de la planificación urbana que en las últimas décadas se han investigado y aplicado diferentes soluciones “flexibles” para el transporte, como la atención de viajes según la demanda, movilidad como servicio (MaaS), vehículos EV’s (autónomos y/o eléctricos) y microsimulaciones de tránsito (Lättman et al., 2020). Ahora bien, dependiendo de la estructura urbana y las características topográficas de una ciudad, es posible encontrar dificultades de inserción de los diferentes modos de transporte. Estas dificultades se encuentran asociadas a la imposibilidad de ampliación de corredores viales, disminución de pendientes, construcción de nuevos trayectos, variadas condiciones de flujos vehiculares y cambio de la conciencia social (Ferster et al., 2021). Lo anterior genera importantes conflictos al momento de poner en marcha proyectos de inserción de modos de transporte activo dados los requerimientos de espacio para su operación, lo que conlleva a una redistribución de éste, afectando directamente modos tradicionalmente priorizados.

El concepto de accesibilidad es empleado desde la segunda década del siglo XX (Batty, 2009), es una medida de la facilidad de conexión entre usuarios y destinos (Hewko, et al., 2002), con un alto impacto en la geografía y análisis espacial. Esta definición, parte de la idea original establecida por Hansen (1959), en donde se define el concepto básico como “el potencial de oportunidades para la interacción”, entendiéndose por oportunidades las variadas actividades disponibles en el territorio. A pesar de la existencia de variadas definiciones del concepto, que difícilmente llegarían a un consenso (Murray y Wu, 2003), se han identificado cinco componentes (Geurs y Van Wee, 2004) que pueden abordarse individual o simultáneamente: i) componente de actividades, oportunidades y usos del suelo; ii) componente de sistemas de transporte y condiciones operativas; iii) componente temporal; iv) componente individual; y v) componente cognitivo (Lucas, 2012). En la Tabla 1 se presenta un resumen de la revisión literaria empleada como soporte de la investigación. En las columnas se presentan las temáticas abordadas en este estudio y que también han trabajado otros autores.

Tabla 1: Diagrama de información literaria.

<i>Autor</i>	<i>Modo</i>	<i>Impacto</i>	<i>Accesibilidad</i>	<i>Escala</i>	<i>Cobertura</i>	<i>Equidad</i>	<i>Sostenibilidad</i>
Hansen (1959)	Privado		Relativa, Potencial	Urbano	x		
Geurs y Van Wee (2004)			Potencial				
Reggiani et al. (2011)			Potencial	País			
McNeil (2011)	Activo	x	Contorno	Urbano	x		x
Bocarejo y Oviedo (2012)	Público		Potencial	Urbano	x	x	
Rojas et al. (2012)	Privado, Público, Activo	x		Urbano			x
Fishman et al. (2014)	Privado, Activo	x		Urbano			x
Walsh et al. (2017)			Geográfica	País	x	x	
Biazzo et al. (2019)	Privado, Público		Contorno	Urbano	x	x	x
Hamidi et al. (2019)	Público, Activo	x	Potencial	Urbano		x	x
Saif et al. (2019)	Público					x	x
Lättman et al. (2020)	Privado, Activo	x		Urbano			x
Li et al. (2020)	Activo		Potencial	Urbano	x		
Song et al. (2020)	Activo		Potencial	Urbano	x		x
Wu y Levinson (2020)			Integral, Geográfica, Contorno	Urbano	x		
Ferster et al. (2021)	Activo			Urbano		x	x

Respecto a las valoraciones empleadas, se encuentra el modo de transporte Privado (auto, moto), Público (autobús, tren, cable aéreo, taxi, etc.) o activo (bicicleta, caminata). La valoración del impacto relaciona la existencia de comparativas al interior del estudio por la implementación de un sistema, metodología o intervención. El tipo de accesibilidad relaciona el modo de evaluación empleado en el estudio (relativa, potencial, integral, geográfica, medidas de contorno, etc.). En cuanto a la escala, se identifica si el estudio es a nivel rural, urbano o nacional. Por parte de la temática de cobertura, se relaciona la existencia de valores de beneficio o afectación poblacional; la equidad, es considerada como la posibilidad de encontrar análisis por tipologías de género o condición socioeconómica. Por último, la valoración de sostenibilidad hace referencia al planteamiento de medidas de mitigación o implementación de mecanismos para conservación del medio ambiente y desarrollo sostenible.

Cada una de estas interpretaciones, basan su operatividad en funciones probabilísticas, acorde a las impedancias de análisis (Reggiani, et al., 2011), en donde normalmente se utilizan, valoraciones de tiempo de viaje o distancia. En nuestro caso particular emplearemos la accesibilidad para la valoración en tiempo medio de viaje, basándonos en la accesibilidad geográfica, presentada como mapas de curvas isócronas (Biazzo et al., 2019), la cual es recíproca de la medida de accesibilidad de Hansen, donde el conjunto de nodos incluye todas las oportunidades dentro de la red. En el proceso de cálculo de la accesibilidad, la impedancia de viaje para alcanzar dichas oportunidades se suma y se promedia a través del número total de éstas (Wu y Levinson, 2020); así mismo, se encuentran investigaciones que abordan el concepto de accesibilidad “percibida” por los usuarios de diferentes modos de transporte y su relación con posibles restricciones al uso del vehículo privado a la luz de la transformación de los sistemas actuales de transporte y uso del suelo hacia la sostenibilidad (Lättman et al., 2020). Algunas de estas mediciones de accesibilidad comprenden análisis de condición social (Bocarejo y Oviedo, 2012) y equidad (Saif et al., 2019; Walsh et al., 2017), las cuales garantizan una visualización general de las dificultades o beneficios percibidos por la población, así mismo, se tienen valoraciones de impacto respecto a la inclusión de modos de transporte alternativos (Hamidi et al., 2019; Song et al., 2020) e investigaciones que evalúan cómo la ciclo-infraestructura impacta las condiciones de accesibilidad en bicicleta (McNeil, 2011) a partir de variables entre las que se encuentra la operatividad del transporte automotor privado y los usos del suelo (Li et al., 2020). A pesar que existen una gran variedad de estudios que abordan el concepto de accesibilidad, ninguno de éstos abordó puntualmente los cambios suscitados en las condiciones de accesibilidad del modo de transporte automotor privado, dada la adaptación del espacio disponible para dar cabida a un modo activo, lo cual se establece como la novedad del presente artículo de investigación. Es deseable que disminuyan los viajes en vehículos automotores, para lo cual es importante el aumentar la cuota de viajes en modos activos, teniendo en cuenta que para personas que nunca han usado la bicicleta como modo para llegar al trabajo, la disminución en el tiempo de viaje es la principal variable para tomar la decisión de cambiarse a dicho modo (Bergström y Magnusson, 2003), teniendo en el cálculo de las condiciones de accesibilidad, una metodología válida para determinar dicha disminución de tiempo. Ahora bien, observando la información de la Tabla 1, es posible argumentar que, la estructuración del presente documento, a pesar de hacer uso de la accesibilidad y enmarcar el análisis en un entorno urbano, permite aportar en el desarrollo de las temáticas de cobertura, impacto, equidad y sostenibilidad, las cuales, en su análisis conjunto, presentan carencias dentro de la literatura.

En los procesos de planificación del transporte, se han usado herramientas tradicionales como las encuestas origen – destino y estudios de demanda, no obstante, en la actualidad, estos enfoques se han complementado con la validación de propuestas de intervención mediante modelos de oferta de infraestructuras del transporte y análisis de redes sociales (Ferster et al., 2021) como instrumentos de captura de datos y evaluación de la aceptación o no de las intervenciones. Otras investigaciones han demostrado que para que los programas de bicicletas compartidas optimicen su impacto en la reducción del uso del vehículo automotor privado, es necesario implementar medidas centradas en fomentar el trasvase modal (Fishman et al., 2014), lo que redundará en mayores beneficios para la salud de la población y en una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Rojas et al., 2012). En este sentido, es de gran interés el conocer cómo afecta la adaptación de modos de transporte activo (ciclo-infraestructura y caminata) las condiciones de accesibilidad percibida por los usuarios de vehículos automotores privados, pues así se podrían visualizar las posibles afectaciones y la forma de mitigarlas, con el fin de mantener unas adecuadas condiciones de movilidad para todos los actores viales. Es por ello que investigaciones basadas en modelos de oferta de transporte se configuran como un importante complemento para el impulso de proyectos inserción de ciclo-infraestructura.

El alcance de la investigación se enmarca en establecer los cambios en las condiciones de accesibilidad ofrecida por la red de infraestructuras del transporte a los usuarios del transporte automotor privado, dadas las intervenciones propuestas sobre un corredor de movilidad, entre las cuales se encuentra la inserción de infraestructura ciclista segregada. La principal hipótesis se basa en que es posible insertar infraestructura para el modo activo de transporte a lo largo de un corredor de movilidad sin afectar de forma sustancial las condiciones de accesibilidad de los usuarios del transporte privado automotor. Actualmente, la planificación

urbana que se aplica en la gran mayoría de ciudades del mundo, se apoya en proyectos que buscan la conversión de corredores de movilidad proporcionando espacio a modos de transporte sostenibles, que contribuyan a cubrir necesidades a nivel ambiental, social y cultural, de allí nuestra motivación para llevar a cabo la presente investigación. Desde el punto de vista metodológico, se seleccionó una medida de accesibilidad de contorno, pues como se mencionó con anterioridad, una de las principales variables que tiene en cuenta un usuario de un modo automotor para decidir usar un modo activo es si realmente existe un ahorro en el tiempo de viaje.

Contexto geográfico de la investigación

Manizales es la capital del Departamento de Caldas, se encuentra localizada sobre la franja central de la cordillera Andina (Figura 1), a 168.2 kilómetros en línea recta de Santafé de Bogotá. Cuenta con una topografía abrupta, de elevación media de 2150 msnm, en donde habitan 513589 personas (CPC, 2020) en un área de 572 km² (Alcaldía de Manizales, 2020). En la ciudad se registran 750 mil viajes diarios, de los cuales el 36,8% se realizan en transporte automotor privado, 33,5% en transporte público y 29,7% en transporte activo; por otra parte, la ciudad cuenta con 730,6 Km de red de infraestructuras del transporte, de los cuales el 17% son corredores primarios de movilidad, el 9% secundarios, el 14% colectores y el 60% locales (Alcaldía de Manizales, 2017).

Fig. 1: Localización de la ciudad de Manizales

Por otra parte, Manizales ocupa puesto 5 entre las 32 capitales departamentales, en la calificación de la variable infraestructura (CPC, 2020), con una calificación de 5.7/10; así mismo, en la variable de sostenibilidad ambiental, la ciudad ocupó el sexto lugar, con una calificación de 6.0/10. Es decir, a pesar de que la ciudad de Manizales sea la tercera ciudad más competitiva de Colombia (CPC, 2020), y comprendiendo que el progreso de ésta en múltiples dimensiones es innegable, es imperativo actuar con decisión para resolver los desafíos estructurales que, en términos de movilidad sostenible e infraestructura, permanecen. En este sentido, Manizales, ha volcado su mirada hacia el desarrollo de infraestructura de mayor impacto ambiental, fomentando así el uso de modos de transporte autónomos, que permitan una modificación del modelo de movilidad cotidiano de los habitantes, hacia modos de menor impacto ambiental. Uno de estos es la formulación de la nueva infraestructura ciclista y peatonal asociada al proyecto Campus Manizales. Ciudad Universitaria + Ciudad conectada (Alcaldía de Manizales, 2020), en donde se propone la construcción de 16.4 km. de ciclorruta, sobre el corredor principal de la ciudad, entre los principales polos económico de la ciudad con anchos de 1.4 m. y 2.6m. si es unidireccional o bidireccional, respectivamente. Es por lo anterior que, a partir de tan importante intervención, se evidencia una incertidumbre significativa, asociada a la afectación de la movilidad de los modos de transporte ya establecidos, debiéndose impulsar un fuerte cambio de

comportamiento de los usuarios de transporte automotor privado, para garantizar la correcta incorporación y funcionamiento de un nuevo corredor para transporte activo.

A raíz de esta incertidumbre, en la presente investigación se plantea un análisis de impacto mediante accesibilidad geográfica, de las afectaciones en oferta del transporte de la ciudad, producto de las intervenciones propuestas por la administración municipal, adicionando un análisis de valoración poblacional por estratificación socioeconómica, lo que se considera fundamental con el fin de establecer si las intervenciones impactan aquellos estratos que más necesitan de opciones de transporte o de nuevas opciones para realizar su trasvase modal. Como principal resultado se obtuvo que la intervención infraestructural propuesta con fines de insertar el modo de transporte activo (ciclo-infraestructura) no genera un impacto significativo en las condiciones de accesibilidad de los usuarios del transporte automotor privado. Luego de la introducción se presenta la metodología abordada para la investigación, posteriormente se presentan los principales resultados y la discusión de éstos, para finalizar con las principales conclusiones.

METODOLOGÍA

La metodología abordada en la investigación se compone de siete etapas consecutivas, las cuales se exponen a continuación; ahora bien, esta metodología de análisis de accesibilidad, a pesar de no ser original, pues ha sido usada en múltiples estudios, el uso de la misma en relación con el cálculo de los cambios en las condiciones de accesibilidad del transporte automotor privada dada la adaptación del modo activo, sí es una aplicación novedosa.

Recolección de información base

En esta etapa se procede a recolectar la información base necesaria para la ejecución del análisis. La información geográfica (red de infraestructuras del transporte) con sus respectivas características topológicas (direccionalidad, longitud y pendiente), se obtuvo del Plan Maestro de Movilidad (Alcaldía de Manizales, 2017), el cual fue suministrado por la Administración municipal. La velocidad de operación sobre los arcos de la red se obtuvo en el marco del proyecto “Centralidad Universitaria + Ciudad Conectada” ejecutado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales (Alcaldía de Manizales, 2020).

Estructuración y optimización de la red de infraestructura

En esta etapa es importante resaltar que la red de modelación de infraestructuras del transporte contempla la actualización de ésta con diferentes intervenciones realizadas por la administración municipal en el periodo 2010 – 2020. En la Figura 2 se presenta la estructura base de la red de modelación, así como la red que se intervendría en términos de adaptar su sección transversal de tal forma que soporte los viajes de usuarios del modo activo (bicicletas y caminata) y del modo privado automotor.

Fig. 2: Red vial base de modelación y red que se propone adaptar con ciclo-infraestructura.

Calibración y validación de la red de infraestructura

Para el cálculo de las condiciones de accesibilidad se aplica el algoritmo de caminos mínimos entre los nodos de la red, por lo que para calibrar y validar sus resultados se debe comparar con valores de tiempo de viaje obtenidos en el mundo real. Por ello se comparan los tiempos de viaje obtenidos en pares origen destino

aleatorios y distribuidos geográficamente en la red, con los obtenidos a partir de la API (Interfaz de programación de aplicaciones) Distance Matrix de Google Maps, la cual permite obtener los tiempos de viaje entre pares origen-destino considerando distintos modos de transporte y el nivel de tráfico actual. El desarrollo de la calibración contempla la construcción de matrices de tiempo de viaje entre un conjunto de puntos de control específicos que se analizan a través de un modelo de regresión lineal. Una vez realizado el proceso de regresión lineal se calibra la red, involucrando las penalizaciones por giro con el fin de que los tiempos de viaje del modelo sean similares a los obtenidos del aplicativo (Cardona et al., 2020).

Construcción de curvas de accesibilidad

En esta etapa el modelo toma como punto de partida la formulación de los tiempos de viaje de cada arco de la red de infraestructura haciendo uso de la Ecuación 1. Donde, tv_x = Tiempo de viaje del arco x en minutos; $longitud_x$ = Longitud del arco x en kilómetros; $velocidad_x$ = Velocidad del arco x en km/h.

$$tv_x = \left(\frac{longitud_x}{velocidad_x} \right) * 60 \quad (1)$$

Posteriormente se construye la matriz de tiempos mínimos de desplazamiento entre todos los nodos de la red mediante el uso de la herramienta TransCad, extensión *Multiple Paths*, aplicando el algoritmo de caminos mínimos de viaje (Dijkstra, 1959; Lu y Camitz, 2011), en donde se evalúan las diferentes posibilidades de conexión entre dos puntos, seleccionando la ruta que contenga el menor costo para el usuario (Wu et al., 2015). Una vez obtenida la matriz de tiempos $n \times n$, asociada a todos los nodos de la red, se procede a calcular el vector de tiempos medios de viaje para cada uno de éstos empleando la Ecuación 2. Con el vector de tiempo medio de viaje se construyen las curvas isócronas de accesibilidad, haciendo uso de la herramienta *Geostatistical Wizard* de ArcMap. Donde, $\bar{tv}_i$ = Tiempo medio de viaje del nodo i hacia los demás nodos de la red en minutos; tv_j = Tiempo de viaje del nodo i al nodo j en minutos; n = Número de nodos existentes.

$$\bar{tv}_i = \frac{\sum_{j=1}^n tv_{ij}}{n - 1} \quad (2)$$

Escenario de Valoración

A partir de la valoración de accesibilidad, se procede a reestructurar la red de modelación, según las diferentes intervenciones necesarias para el óptimo funcionamiento de la red de ciclo-infraestructura propuesta por la administración municipal (Alcaldía de Manizales, 2020). Las intervenciones propuestas, involucran la eliminación de giros, redireccionamiento de flujos, construcción de infraestructura y adaptación del espacio disponible. Cada una de las intervenciones se estructura desde el aplicativo ArcMap, con sus respectivas valoraciones y optimizaciones para su óptima funcionalidad en la modelación.

Análisis de Impacto

Una vez definido el escenario de valoración y construidas las curvas de accesibilidad para el escenario actual, se procede a determinar el impacto generado por las intervenciones propuestas. El procedimiento contempla la aplicación de la Ecuación 3 mediante el uso de la extensión *Geostatistical Wizard*, en la cual se determina el ahorro porcentual de tiempo medio de viaje que sería percibido por los usuarios. Donde tv_{actual} = tiempo medio de viaje en el escenario actual, tv_{futuro} = tiempo medio de viaje en el escenario de valoración.

$$Ahorro (\%) = \frac{(tv_{actual} - tv_{futuro})}{tv_{actual}} * 100 \quad (3)$$

Análisis de cobertura

Esta etapa involucra información sociodemográfica (población y área) y socioeconómica (estratos socioeconómicos), que es oficialmente definida por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE. La primera se relaciona con la obtención de las variables población y área; la segunda definida en base a la estratificación social aplicada en Colombia, la cual se estableció a partir de la Ley 142 de 1994, como la forma en la que se clasifican los hogares a partir de criterios basados en las condiciones de la vivienda y el entorno donde ésta se encuentra (Figura 3). La estratificación socioeconómica va del estrato 1 al estrato 6 según la capacidad económica del sector, siendo el estrato 1, sectores con hogares de baja capacidad y el estrato 6, sectores con hogares de alta capacidad. A partir del cruce de información y las curvas de accesibilidad obtenidas para la condición actual y futura. El procedimiento se realiza mediante el uso de la extensión *Geoprocessing Intersect* de ArcMap, seguido por la construcción de las ojivas porcentuales de cobertura acumulada en la herramienta Microsoft Excel.

Fig. 3: Estructura socioeconómica por estratos en la ciudad de Manizales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado del proceso de calibración de la red de infraestructuras del transporte, el cual es soporte fundamental para el análisis de accesibilidad, se observan en la Figura 4 los tiempos de viaje obtenidos a través de la API Distance Matrix de Google Maps y los obtenidos a través del algoritmo de caminos mínimos. Se obtuvo que los puntajes establecidos para calificar el modelo fueron adecuados con un r^2 de 0.85, un porcentaje de error medio absoluto de 13.3% y un error absoluto medio de 1.5 minutos. Estos valores entre el valor predicho (algoritmo de caminos mínimos) y observado (API de Google Maps) nos indican que no es necesario usar penalidades por giro para la correcta calibración del modelo.

Fig. 4: Tiempo de viaje del Algoritmo de caminos mínimos vs observado API de Google Maps.

Accesibilidad escenario actual

Las condiciones de accesibilidad para el modo de transporte privado en el escenario actual se presentan en la Figura 5. Se aprecia la variación en tiempo medio de viaje en intervalos de 2 minutos, observándose adecuadas condiciones de desplazamiento de los usuarios residentes del entorno CBD (Central Business District) y el sector del Cable, con un tiempo medio de desplazamiento entre 10 y 12 minutos. Por otro lado, los sectores periféricos de Maltería y La Linda reflejan los mayores costes de desplazamiento, al requerir entre 42 y 44 minutos, debido principalmente a su ubicación geográfica, además de la poca disponibilidad en infraestructura de conexión. A nivel general, los sectores aledaños al corredor CBD – El Cable, presentan valoraciones en tiempo mayores, sin embargo, los requerimientos en tiempo no superan los 24 minutos, situación que facilita el desplazamiento de los usuarios hacia cualquier sector de la ciudad.

Fig. 5: Accesibilidad geográfica en el escenario actual

Respecto a los niveles de cobertura poblacional y de área, en la Figura 6a se presentan las ojivas porcentuales de cobertura acumulada, asociadas al escenario actual. Se observa que los requerimientos en tiempo para el desplazamiento de los usuarios, no supera los 14 minutos para cubrir más del 50% de la población, lo cual afirma la condición de eficiencia de la red en el estado actual; por parte de la variable área, se requiere de 2 minutos adicionales para lograr el mismo nivel de cobertura. Este comportamiento, evidencia que, gran parte de la población se encuentra residiendo en entornos cercanos a las zonas de mayor facilidad de desplazamiento, es decir, la densidad poblacional es mayor en el entorno central de la ciudad y decrece hacia los sectores periféricos. Respecto al total de cobertura, a modo general, no se requiere de más de 28 minutos para satisfacer las necesidades de los usuarios, no obstante, existen algunos remanentes que debido a su bajo número, no logran ser percibidos en la construcción gráfica. En la Figura 6b se identifican los niveles de cobertura ofrecidos a los usuarios por parte de la red de infraestructura según el estrato socioeconómico al cual pertenecen. En este sentido, la gráfica presenta cómo el estrato de mejores condiciones de accesibilidad es el estrato 5, al no superar los 14 minutos para cubrir más del 90% de su población.

Fig. 6: Ojivas porcentuales de cobertura acumulada, a) población, área y b) estrato, escenario actual

Subsecuentemente, se encuentra el estrato 6, el cual logra satisfacer sus necesidades en un tiempo no superior a los 16 minutos. Por parte de los estratos 1, 3 y 4, la valoración en cobertura muestra un comportamiento semejante, con un tiempo inferior a los 20 minutos de desplazamiento. Por último, el estrato número 2, a pesar de presentar un comportamiento semejante a los estratos 1, 3 y 4, en un tiempo de viaje inferior a los 16 minutos, es el estrato de mayor requerimiento en tiempo, logrando alcanzar una valoración de 28 minutos para cubrir el 90% de la población. No obstante, la variación en el desarrollo de la curva no refleja una necesidad crítica de desplazamiento en el escenario actual.

Accesibilidad escenario de valoración

Como resultado de la valoración respecto a las intervenciones viales propuestas, se construye la Figura 7, en la cual se aprecian las curvas de accesibilidad en intervalos de 2 minutos. La valoración general, muestra un comportamiento en tiempo de viaje bastante semejante al presentado en el escenario actual, con tiempos de viaje entre los 10.30 minutos y 44 minutos; no obstante, al realizar una valoración más detallada, es posible

identificar variaciones asociadas al entorno del CBD y el sector del Cable, en el cual la curva de tiempo de viaje hasta los 12 minutos presenta un recorte significativo al costado derecho. Por parte del intervalo de tiempo de entre 12 y 14 minutos, se observa una reducción en el área de la curva sobre el costado izquierdo respecto al comportamiento observado en el escenario actual. A pesar de observarse algunas variaciones dentro de las áreas de cada intervalo, existen algunas afectaciones sobre el corredor occidente – oriente y viceversa (Av. Santander), las cuales no son apreciables de forma directa.

Fig. 7: Accesibilidad geográfica en el escenario de valoración de las propuestas de intervención

En la Figura 8a se observan los niveles de cobertura para las variables población y área. A la izquierda, se muestran los niveles de cobertura poblacional, los cuales presentan un comportamiento similar al escenario actual, sin embargo, en el escenario propuesto, el porcentaje cubierto en un tiempo de 14 minutos es algo menor al 50%. Respecto a la variable de área, la calificación general es similar al escenario actual (16 minutos) con 2 puntos porcentuales por debajo para un 50% de cobertura. En la Figura 8b se observa la variabilidad de la cobertura según estrato socioeconómico. Se conservan los valores descritos en el escenario actual, en donde el estrato número 5 requiere del menor tiempo de desplazamiento para satisfacer los requerimientos de movilidad de su población. De igual forma, el estrato número 2, presenta la cobertura más deficiente, con un tiempo de viaje de hasta 28 minutos para suplir las necesidades de los usuarios.

Fig. 8: Ojivas porcentuales de cobertura acumulada, a) población, área y b) estrato, escenario de valoración

Análisis de impacto

Con el fin de dar mayor claridad respecto al impacto generado por las intervenciones viales propuestas en el escenario de valoración, se presenta la Figura 9. En esta, se identifican los porcentajes de afectación, variando de entre 0% y 2.2%, siendo la máxima afectación observada en color rojo. Se aprecia como la variación en el impacto, se presenta sobre el corredor occidente – oriente y viceversa (Av. Santander), con mayor concentración sobre los sectores del Cable y el CBD, en donde se proponen las mayores intervenciones. De forma general se destaca que a pesar de las múltiples intervenciones requeridas para la implementación de la ciclo-infraestructura, no se genera una importante afectación a los usuarios del transporte automotor privado, pues se observa una afectación de máximo el 3% respecto al mayor tiempo de desplazamiento (44 minutos), que representaría un incremento de 1.30 minutos. En la Figura 10a se observa el impacto respecto a la cobertura porcentual de las variables población y área. Al lado izquierdo se observa

cómo el 50% de la población lograría percibir hasta un 0.30% de pérdida en tiempo medio de desplazamiento, concluyéndose que la afectación generada no es significativamente fuerte para el transporte privado automotor al adaptar los corredores de movilidad para alojar ciclo-infraestructura.

Fig.9: Curvas de ahorro porcentual para el escenario de valoración de las propuestas de intervención

En la Figura 10b, se muestra el porcentaje de pérdida porcentual de tiempo relacionado a cada estrato socioeconómico. Inicialmente, el impacto genera una mayor afectación a los estratos 4 y 5, en donde un 50% de la población, percibe hasta un 0.60% de pérdida de tiempo en relación con el escenario actual. Posterior a este valor, la mayor afectación se observa en el estrato 5 con un 30% de la población percibiendo una pérdida de hasta el 0.80%. Por último, las afectaciones generadas para los estratos, posterior al 1% de pérdida, solo generan impacto sobre un máximo del 10% de la población, principalmente en el estrato 1.

Fig.10: Porcentaje de Impacto en: a) población, área y b) estrato, escenario de valoración.

Como discusión final, es posible argumentar que, la migración de viajes hacia modos de transporte más amigables, no generaría un significativo conflicto sobre la operatividad del transporte automotor privado; no obstante, los usuarios de modos de transporte automotor privado tienen en cuenta la accesibilidad percibida, situación que en alguna medida podría afectar la aceptación de las intervenciones infraestructurales sobre la red (Lättman et al., 2020); comprendiendo que la actitud de aceptación de la infraestructura para modo activo de transporte, puede tener un ciclo, comenzando con una resistencia al cambio, seguido de un período de apoyo y actitudes positivas respecto a la misma (Ferster et al., 2021). Lo realmente valioso es que esta iniciativa de trasvase de viajes permite entablar una hoja de ruta en las dinámicas de movilidad, conectando diferentes sectores de la ciudad con una infraestructura ciclista adecuada, tal como se realiza en otras ciudades del mundo (Hamidi, et al., 2019; Song et al., 2020), a pesar de que generalmente los procesos en torno a la inserción de nueva ciclo-infraestructura suelen estar altamente politizados (Ferster et al., 2021).

Es necesario tener en cuenta que a pesar que la accesibilidad percibida cambia significativamente según el usuario (Lättman et al., 2020), el proceso de trasvase de viajes de un modo de transporte a otro, se ve influenciado por las críticas constructivas basadas en experiencias vividas (Ferster et al., 2021); es decir, es posible que mediante la aplicación de los modelos de oferta de transporte, sea posible demostrar que la afectación en las condiciones de accesibilidad dada la redistribución del espacio para dar cabida a un modo

activo, es insignificante, sin embargo la aceptación de estas nuevas condiciones de movilidad se dará a través del tiempo. Dado lo anterior, es necesario no sólo reconocer los efectos ambientales dado el uso de los automotores, sino aumentar el nivel de conciencia en relación con los beneficios para la salud (Bergström y Magnusson, 2003) y su contribución para aumentar la calidad de vida, lo cual podría ayudar a convencer a algunas personas para que usen la bicicleta en lugar de un vehículo automotor; sin embargo, Bergström y Magnusson (2003) encontraron que si la primera experiencia de una persona usando el modo de transporte activo es desagradable, es posible que esa persona no cambie su modo de transporte inicial, lo cual fortalece el argumento de que es necesario mantener estos corredores de movilidad activa en buenas condiciones y adecuada seguridad.

Respecto a la forma de presentación de los resultados, se puede asumir que la mecánica de uso de la accesibilidad geográfica, como medidas de contorno en base a mapas isócronos, clarifica la visualización de los impactos generados por las intervenciones propuestas, respecto a otros mecanismos de valoración existentes en donde solo se presenta una cuantificación para cada sector de la ciudad, sin percibirse un entorno de transición o impacto. Complementariamente, es importante resaltar que, en Colombia se está poniendo en marcha una política social que se encuentra alineada con compromisos adquiridos internacionalmente y que se relacionan con la sostenibilidad ambiental: i) Declaración de Crecimiento Verde de la OCDE (adherida en 2012); ii) declaración ministerial por el Crecimiento Verde de Alianza del Pacífico (firmada en 2016); iii) agenda 2030 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (2015). Dichos compromisos son de suma importancia y este tipo de investigaciones, se encuentran totalmente alineados con el logro de éstos, al proponer la inserción e impulso de redes de transporte activo y sostenible. Se tiene entonces que este tipo de investigaciones busca establecer criterios de sustentabilidad claros y concretos, que se soporten y articulen adecuadamente con el actual modelo de desarrollo, convirtiéndolo en un instrumento fundamental en la toma de decisiones para las autoridades locales.

CONCLUSIONES

A partir de la de los resultados obtenidos, es posible concluir que la implementación propuesta por la administración municipal no genera un impacto significativo en las condiciones de accesibilidad que registrarían los usuarios del transporte automotor privado; dicha situación es adecuada en términos de que los modos de transporte tradicionalmente priorizados no se verían directamente afectados por la adaptación del espacio existente. Por otra parte, se aprecia que, la valoración mediante un modelo de accesibilidad garantiza una mejor observación de las zonas de mayor impacto dadas las intervenciones infraestructurales propuestas, gracias a la aplicación de una metodología cuantitativa y objetiva de comparación entre escenarios. En cuanto a la valoración poblacional, se logra identificar que, los estratos de mayor capacidad económica, 4, 5 y 6, refieren el mayor impacto, lo cual puede ser beneficioso en el sentido de incentivar el intercambio modal al modo de transporte ciclista, sin embargo, se conserva la posibilidad de uso del vehículo privado dado el bajo tiempo medio de afectación; dado lo anterior es de suma importancia el apoyar las decisiones de intervención con un importante trabajo social en la comunidad, con el fin de presentar las ventajas en salud y medioambientales al tomar la decisión de usar un modo de transporte activo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los integrantes Grupo de Investigación en Movilidad Sostenible de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Adicionalmente, se expresa que el desarrollo del estudio se enmarca dentro del proceso de formación doctoral del autor Jorge A. Montoya, como medida de aporte en su crecimiento profesional y capacidad de investigación, en temas relacionados a la accesibilidad y valoraciones de transporte. Se agradece a los pares evaluadores por las contribuciones realizadas.

REFERENCIAS

Alcaldía de Manizales, Proyecto Campus Manizales. “Centralidad Universitaria + Ciudad Conectada”, Manizales, Colombia (2020)

Alcaldía de Manizales, Plan Maestro de Movilidad de Manizales. Línea base y diagnóstico de la situación actual de la movilidad de Manizales, Manizales (2017)

Batty, M., Accessibility: in search of a unified theory, doi: 10.1068/b3602ed, Environment and Planning B. Planning and Design, 36(2), 191-194 (2009)

Bergström, A., y Magnusson, R., Potential of transferring car trips to bicycle during winter, doi: 10.1016/S0965-8564(03)00012-0, Transportation Research Part A, 37, 649–666 (2003)

Biazzo, I., Monechi, B., y Loreto, V., General Scores for Accessibility and Inequality Measures in Urban Areas, doi: 10.1098/rsos.190979, Royal Society Open Science, 6(8) (2019)

- Bocarejo J., y Oviedo D., Transport Accessibility and Social Inequities: A Tool for Identification of Mobility Needs and Evaluation of Transport Investments, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2011.12.004, Journal of Transport Geography 24, 142–54 (2012)
- Cardona, S., Escobar, D., y Henao, E., Accesibilidad Geográfica y Construcción de Paz: un Acercamiento desde el Desarrollo de la Red de Infraestructura Vial, doi: 10.48082/espacios-a20v41n47p02, Revista Espacios, 41(47), 11–26 (2020)
- CPC - Consejo Privado de Competitividad (Punto a parte editores), Índice de Competitividad de Ciudades 2020, 7-17, Bogotá, Colombia (2020)
- Dijkstra, E. W., A Note on Two Problems in Connexion with Graphs, <https://doi.org/10.1007/BF01386390>, Numerische Mathematik, 1(1), 269–271 (1959)
- Ferster, C., Laberee, K., y otros 4 autores, From advocacy to acceptance: Social media discussions of protected bike lane installations, doi: 10.1177/0042098020938252, Urban Studies, 58(5), 941–958 (2021)
- Fishman, E., Washington, S., y Haworth, N., Bike share's impact on car use: Evidence from the United States, Great Britain, and Australia, doi: 10.1016/j.trd.2014.05.013, Transportation Research Part D, 31, 13-20 (2014)
- Geurs, K. T., y Van Wee, B., Accessibility Evaluation of Land-Use and Transport Strategies: Review and Research Directions, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005, Journal of Transport Geography, 12(2), 124-140 (2004)
- Hamidi, Z., Camporeale, R., y Caggiani, L., Inequalities in Access to Bike-and-Ride Opportunities: Findings for the City of Malmö, doi: 10.1016/j.tra.2019.09.062., Transportation Research Part A: Policy and Practice 130, 673–88 (2019)
- Hansen, W., How Accessibility Shapes Land Use, doi: 10.1080/01944365908978307, Journal of the American Institute of Planners, 25(2), 73-76 (1959)
- Hewko, J., Smoyer-Tomic, K.E., y Hodgson, M.J., Measuring Neighbourhood Spatial Accessibility to Urban Amenities: Does Aggregation Error Matter?, doi: 10.1068/a34171, Environment and Planning A, 34(7), 1185-1206 (2002)
- Lättman, K., Friman, M., y Olsson, L., Restricted car-use and perceived accessibility, doi: 10.1016/j.trd.2019.102213, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 78, 1-10 (2020)
- Li, A., Huang, Y., y Axhausen, K., An approach to imputing destination activities for inclusion in measures of bicycle accessibility, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2019.102566, Journal of Transport Geography, 82, 1-9 (2020)
- Lu, X., y Camitz, M., Finding the shortest paths by node combination, doi: 10.1016/j.amc.2011.01.019, Applied Mathematics and Computation, 217(13), 6401-6408 (2011)
- Lucas, K. Transport and social exclusion: Where are we now?, doi: 10.1016/j.tranpol.2012.01.013, Transport Policy, 20(C), 105-113 (2012)
- McNeil, N., Bikeability and the 20-min Neighborhood: How Infrastructure and Destinations Influence Bicycle Accessibility, doi: 10.3141/2247-07, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2247, 53–63 (2011)
- Murray, T., y X. Wu, Accessibility tradeoffs in public transit planning, doi: 10.1007/s101090300105, Journal of Geographical Systems. 5, 93 – 107 (2003)
- Reggiani, A., Bucci, P., y Russo, G., Accessibility and Impedance Forms: Empirical Applications to the German Commuting Network, doi: 10.1177/0160017610387296, International Regional Science Review 34(2), 230–52 (2011)
- Rojas, D., de Nazelle, A., Teixidó, O., y Nieuwenhuijsen, M., Replacing car trips by increasing bike and public transport in the greater Barcelona metropolitan area: A health impact assessment study, doi: 10.1016/j.envint.2012.08.009, Environment International, 49, 100–109 (2012)
- Saif, M., Zefreh, M., y Torok, A., Public Transport Accessibility: A Literature Review, doi: 10.3311/PPtr.12072, Periodica Polytechnica Transportation Engineering 47(1), 36–43 (2019)
- Singh A., Gurtu A., y Singh R., Selection of Sustainable Transport System: A Case Study, doi: 10.1108/MEQ-03-2020-0059, Management of Environmental Quality, 32(1), 100-113 (2020)
- Song, M., Wang, K., y otros 4 autores, Impact Evaluation of Bike-Sharing on Bicycling Accessibility, doi: 10.3390/su12156124, Sustainability, 12, 6124 (2020)
- Walsh, S., Cullinan, J., y Flannery, D., The Impact of Proposed Higher Education Reforms on Geographic Accessibility to Universities in Ireland, doi: 10.1007/s12061-016-9193-3, Applied Spatial Analysis and Policy 10(4), 515–36 (2017)
- Wu, H., y Levinson, D., Unifying Access, doi: 10.1016/j.trd.2020.102355, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 83 (2020)
- Wu, Q., Qin, G., y Li, H., An Improved Dijkstra's Algorithm Application to Multi-core Processors. Metallurgical and Mining Industry, 7(9), 76–81 (2015)
- Xu, J., Saleh, M., y Hatzopoulou, M., A Machine Learning Approach Capturing the Effects of Driving Behaviour and Driver Characteristics on Trip-level Emissions. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117311>, Atmospheric Environment, 224 (2020).