



# ¿Cuánto vale la accesibilidad? Bogotá y sus planes de mejora de la red de transporte

Luis A. Guzmán

[la.guzman@uniandes.edu.co](mailto:la.guzman@uniandes.edu.co)

Victor Cantillo-García

[va.cantillo@uniandes.edu.co](mailto:va.cantillo@uniandes.edu.co)

Daniel Oviedo

[d.oviedo.11@ucl.ac.uk](mailto:d.oviedo.11@ucl.ac.uk)

Julian Arellana

[jarellana@uninorte.edu.co](mailto:jarellana@uninorte.edu.co)

## Documento de trabajo

*Working paper*



## RESUMEN

La accesibilidad ha sido estudiada durante los últimos años bajo diferentes marcos conceptuales y métodos. A pesar de este panorama positivo, la mayoría de las medidas de accesibilidad empleadas en la investigación y en la práctica, no contemplan la dimensión de la (des)utilidad, lo cual podría ser útil para mejorar los procesos de toma de decisiones y de planificación del transporte. Este estudio contribuye a la discusión sobre el uso de medidas de accesibilidad basadas en la utilidad, como insumo para la evaluación de inversiones en infraestructuras de transporte, utilizando modelos de elección discreta y su potencial como una conexión entre las prácticas de planificación del transporte tradicionalmente aceptadas y económicamente orientadas. Este estudio utiliza datos combinados de preferencias reveladas y preferencias declaradas en Bogotá, Colombia. Además, usa una medida de accesibilidad basada en la utilidad para estimar el impacto de un conjunto de intervenciones de infraestructura sobre el bienestar de la población, teniendo en cuenta sus características socioeconómicas. En particular, esta medida de accesibilidad analiza los potenciales cambios en la red de transporte público de Bogotá, reflejando su efecto sobre la accesibilidad y el excedente del consumidor en los próximos 20 años. Este enfoque propuesto, estima y cuantifica los beneficios en accesibilidad derivados de los cambios de la infraestructura de transporte, lo cual es muy relevante para los debates sobre la política y la práctica del transporte en éste y otros contextos urbanos similares. A estas ganancias de accesibilidad se les asigna un valor monetario para que se incluyan en las evaluaciones costo-beneficio de los proyectos.

Palabras clave: accesibilidad basada en utilidad, logsum; excedente del consumidor; evaluación de proyectos; Bogotá.

*Este documento es una versión adaptada de un artículo original publicado en Journal of Transport Geography.*

Cómo citar: Guzman, Cantillo-García, Arellana, Oviedo, 2023. How much is accessibility worth? Utility-based accessibility to evaluate transport policies. *Journal of Transport Geography*, 112, 103683. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2023.103683>

## **1. INTRODUCCIÓN**

La accesibilidad es un concepto popular en la investigación en transporte y movilidad urbana. De manera simplificada, la accesibilidad se refiere a la “facilidad” con la que las personas pueden alcanzar las distintas oportunidades (económicas, educativas, de ocio, de salud, etc.) que ofrece un territorio en función de las condiciones de transporte. Sin embargo, el lento avance en la adopción de un enfoque orientado a la accesibilidad en la planificación del transporte (ya que históricamente se ha hecho énfasis en la movilidad y no en el acceso), particularmente en contextos latinoamericanos, ha ampliado las brechas vinculadas a la movilidad y ha provocado un deterioro de la calidad de vida de los ciudadanos en toda la región (Vecchio et al., 2020). Esto se debe en parte a la persistencia de un enfoque utilitarista en la planificación del transporte y a los procesos que dan prioridad al usuario “promedio” como reflejo de las necesidades de desplazamiento de toda una población (Oviedo y Nieto-Combariza, 2021), así como a la falta de consenso sobre las medidas de accesibilidad (Handy, 2020). La accesibilidad suele definirse y operacionalizarse de diversas maneras y con varios significados. Las políticas orientadas a la accesibilidad sólo pueden hacerse realidad si el concepto es fácil de interpretar y comprender para los planificadores y los responsables de la toma de decisiones (Geurs y van Wee, 2004).

Numerosos estudios han contribuido a cuantificar diferentes formas de accesibilidad. En la práctica, tres medidas de accesibilidad se encuentran comunmente en la literatura y están bien documentadas y explicadas: de contorno, basadas en gravedad y basadas en la utilidad. Las dos primeras medidas son populares en los estudios de geografía y planificación urbana debido a su facilidad de cálculo y comunicabilidad. Sin embargo, ambas medidas asumen que todas las oportunidades son igualmente deseables, independientemente del modo de transporte utilizado y de las características socioeconómicas del viajero. Estas limitaciones son importantes si se tienen en cuenta los entornos cada vez más complejos para la movilidad urbana en los que se realizan estas elecciones (es decir, las personas pueden elegir entre varios modos, tener múltiples opciones para sus desplazamientos y valorar su tiempo de forma diferente).

Aunque las medidas basadas en la utilidad son más difíciles de interpretar y comunicar, estas pueden superar algunas de las anteriores limitaciones incorporando elementos

adicionales al análisis. Las medidas basadas en la utilidad pueden estimarse mediante modelos de elección discreta, que se basan en la teoría del comportamiento de la Maximización de la Utilidad Aleatoria (RUM, por sus siglas en inglés) (McFadden, 2001), utilizando el denominador del modelo logit multinomial (conocido como logsum). Este enfoque permite evaluar la utilidad máxima percibida, es decir, la diferencia entre la disposición a pagar y el costo generalizado del viaje, en una situación de elección de viaje considerando la disponibilidad de alternativas de transporte, la combinación de modos en viajes multimodales y las preferencias del individuo. Además, el logsum, visto como una medida de accesibilidad, puede vincularse a la teoría microeconómica permitiendo estimar el excedente del consumidor por segmentos de población (Ortúzar y Willumsen, 2011). En resumen, las medidas de accesibilidad basadas en la utilidad interpretan la accesibilidad como el resultado de un conjunto de alternativas de transporte (Geurs y van Wee, 2004), indicando la deseabilidad del conjunto completo de elección (Ben-Akiva y Lerman, 1985). Esta medida permite estimar los beneficios, en términos del excedente del consumidor, que obtienen las personas del acceso a oportunidades distribuidas por el territorio.

Este estudio busca estimar un indicador de accesibilidad basado en la utilidad para Bogotá, utilizando un modelo de elección modal del tipo logit, estimado mediante la combinación de datos de preferencias reveladas (PR) y preferencias declaradas (PD). Este enfoque permite cuantificar el bienestar de los cambios de accesibilidad debido a las inversiones en transporte en dos escenarios hipotéticos. Estos escenarios consideran un conjunto de proyectos de infraestructura de transporte para la región de Bogotá. Este enfoque también permite evaluar los efectos distributivos para diferentes segmentos de población, teniendo en cuenta la complejidad de los cambios en las distribuciones espaciales de los patrones de viaje y en los beneficios para los diferentes usuarios.

Usando una métrica que se centra en la comprensión de los beneficios del individuo para llegar a sus diversos destinos, la accesibilidad se expresa en términos económicos, considerando una función de demanda de transporte. Una medida de este tipo tiene el potencial de contribuir positivamente a una mejor planificación urbana y complementar la evaluación económica de proyectos captando el valor de la. También es posible estimar los beneficios del usuario debido a las nuevas infraestructuras de transporte, los cuales son representados por la mejora de la accesibilidad. Estos beneficios se miden como excedente

del consumidor de la movilidad diaria a partir de un conjunto de políticas de transporte aplicadas en escenarios hipotéticos respecto a un escenario de referencia. El excedente del consumidor se asocia entonces a los cambios en la accesibilidad entre escenarios.

El cambio de concepción de la accesibilidad, es decir, ir de los costos de viaje a los beneficios personales, incluidas las preferencias de los usuarios, brinda la oportunidad de planificar y evaluar proyectos y políticas que promuevan el acceso a los recursos urbanos centrándose en la accesibilidad como factor de bienestar. Este análisis pretende suscitar reflexiones sobre la dimensión subjetiva de la accesibilidad y las diferencias entre beneficios y (des)utilidades.

## **2. LA ACCESIBILIDAD BASADA EN LA UTILIDAD Y EL EXCEDENTE DEL CONSUMIDOR**

La accesibilidad se ha estudiado ampliamente en la literatura internacional durante más de un siglo. Sin embargo, solo un número limitado de estudios ha explorado los vínculos entre accesibilidad y bienestar utilizando medidas de accesibilidad basadas en la utilidad, especialmente en las economías en desarrollo. La accesibilidad basada en la utilidad se fundamenta en la teoría microeconómica y supera algunas limitaciones de las medidas tradicionales de accesibilidad porque captura la heterogeneidad de las preferencias, percepciones y características sociodemográficas de los viajeros (Bhat et al., 2000; Geurs y van Wee, 2004). Como resultado, es posible cuantificar el grado en que la accesibilidad está influenciada por las percepciones individuales (Pot et al., 2021). Este tipo de métricas para la accesibilidad no se ha utilizado frecuentemente en el contexto latinoamericano, con aún menos aplicaciones que consideren los beneficios para el viajero derivados de los cambios en el excedente del consumidor inducidos por intervenciones urbanas específicas.

La definición de accesibilidad basada en la utilidad se basa en la deseabilidad de un conjunto de opciones (Ben-Akiva y Lerman, 1985). En este caso, esas opciones son alternativas de transporte. En otras palabras, la accesibilidad se mide a nivel individual teniendo en cuenta las características de los viajeros y los atributos de cada modo de transporte disponible (Banister y Berechman, 2001). Esta medida puede estimar los beneficios de los usuarios de los proyectos de transporte y de los cambios en los usos del suelo. Por lo tanto, en un modelo logit multinomial (MNL) estándar, es posible utilizar el

componente logsum como medida de accesibilidad, el cual corresponde al logaritmo natural del denominador de la probabilidad del MNL. En este caso, el logaritmo es una consecuencia de la estructura del modelo logit, como demostró Williams (1977) y su función no limita los beneficios de las oportunidades adicionales como en las medidas de accesibilidad de contorno o de gravedad. Esta definición es coherente con el concepto del excedente del consumidor (Niemeier, 1997) (beneficio neto) en el uso de las oportunidades alcanzables dentro de una determinada impedancia (costo de viaje).

Desde una perspectiva comportamental, el logsum puede entenderse como el valor que un viajero espera al escoger dentro de un conjunto de alternativas, o una medida de la utilidad máxima esperada del conjunto de elecciones (Chorus, 2012). Si la accesibilidad se interpreta como el resultado de una elección en un conjunto de opciones de transporte, el término logsum puede entenderse como una medida de la accesibilidad basada en la utilidad (Geurs y van Wee, 2004) que depende de las funciones de demanda estimadas en los modelos de elección modal. Como las funciones de demanda dependen de las percepciones y preferencias de quien elige, éstas tienen un componente de valoración subjetiva que influye en la utilidad esperada. Esto significa que la variabilidad de la medida de accesibilidad depende de la especificación del modelo de elección. En otras palabras, si el modelo incluye variables socioeconómicas y términos de interacción, la medida de accesibilidad puede mostrar variabilidad entre individuos. En caso contrario, la accesibilidad mide la media de la población. Como el logsum representa la máxima utilidad esperada, cuanto mayor sea el logsum, mayor será la accesibilidad percibida por el viajero. Dado que los viajes se consideran una demanda derivada, el logsum representa una medida de la desutilidad experimentada por un individuo que realiza un viaje en función de los modos de transporte disponibles (el conjunto de elección).

Pocos estudios empíricos capturan la heterogeneidad de las preferencias en la accesibilidad con respecto a las características socioeconómicas. Por ejemplo, Ziemke et al. (2018) en Nelson Mandela Bay, Sudáfrica, encontraron que la accesibilidad basada en la utilidad precisa bajos requisitos de datos de entrada y tiene ventajas en términos de interpretabilidad y sensibilidad política. Lu et al. (2014) presentan una medición de la accesibilidad basada en la utilidad para estimar los efectos de las diferentes formas de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en la accesibilidad. Nassir et al.

(2016) capturan el comportamiento de los pasajeros de transporte público y sus percepciones subjetivas de el costo de viaje para medir la accesibilidad de la red de transporte público en Brisbane (Australia). En Denizli, Turquía, y también en un sistema de transporte público, Gulhan et al. (2013) evalúan un indicador de accesibilidad basado en la utilidad como un nuevo parámetro para apoyar el proceso de toma de decisiones para inversiones y regulaciones, teniendo un sistema más eficaz en términos de accesibilidad. Hasnine et al. (2019) desarrollaron una medida de accesibilidad basada en un modelo de elección discreta integrada en una herramienta basada en SIG para explicar el umbral del tiempo de viaje a pie en el sistema de transporte público de Toronto. Un estudio realizado en Londres utiliza medidas logsum de accesibilidad y demuestra que ignorar las características individuales puede conducir a una subestimación de la variabilidad en la accesibilidad y entonces, causar análisis de equidad poco fiables (Dixit y Sivakumar, 2020).

A pesar de estas aplicaciones, aún no se han generalizado estos conocimientos en un enfoque orientado a la accesibilidad para evaluar las intervenciones urbanas a medio y largo plazo y que además, incluyan las características sociodemográficas de los viajeros. En América Latina, las métricas de accesibilidad han sido aplicadas para diagnosticar la configuración actual de los paisajes urbanos, básicamente por la comunidad académica. Por ejemplo, existen estudios relacionados con la medición de las desigualdades en la accesibilidad al trabajo (Guzman et al., 2017b; Hernandez, 2018; Slovic et al., 2019) y salud (Pereira et al., 2021), o el impacto del costo monetario del transporte en la accesibilidad (Guzman y Oviedo, 2018; Herszenhut et al., 2022). Hay otras investigaciones sobre la influencia de la localización de la vivienda social en las desigualdades de accesibilidad (Martínez et al., 2018) o el efecto del hacinamiento en el transporte público y la sensibilidad al tiempo de viaje en la accesibilidad percibida al trabajo (Arbex y Cunha, 2020; Pereira, 2019). Sin embargo, esas investigaciones se basan en medidas de accesibilidad de contorno/isócronas y gravitacionales. Con el fin de suplir esta carencia, es necesario desarrollar un marco centrado en el análisis de bienestar, que permita evaluar un indicador basado en la utilidad en función de diferentes características individuales. Con base en la literatura, proponemos que tales diferenciaciones incluyan el sexo, el nivel de ingreso y la ocupación, dando un paso más en el debate sobre la implicación política de la accesibilidad en América Latina.

Además de lo anterior, es importante poner en contexto las ganancias de bienestar (excedente del consumidor). En la economía del bienestar, el excedente del consumidor se mide en términos monetarios, por los beneficios recibidos en una situación de elección (es decir, quien decide, elige la alternativa que le proporciona la mayor utilidad). Cabe destacar que la disposición a pagar puede no ser igual a lo que la gente paga realmente. De ahí que el excedente del consumidor esté vinculado a la disposición a pagar por un bien o servicio. Esto refleja el valor que los individuos dan al bien o servicio asociado con el nivel de bienestar que obtienen por acceder a él. Examinar la accesibilidad en términos de ganancias de bienestar tiene un valor práctico adicional, ya que la evaluación económica es el método estándar para evaluar políticas y la inversión pública. Esto conduce a una necesidad explícita de expresar los efectos de la accesibilidad en términos monetarios (van Wee, 2016). Las medidas basadas en la utilidad estiman una valoración de la accesibilidad por parte de los individuos, proporcionando un fundamento valioso para el análisis costo-beneficio o las evaluaciones de análisis multicriterio de las inversiones en transporte.

Más allá de los indicadores tradicionales de accesibilidad, la inclusión de la heterogeneidad de las preferencias es un avance hacia una mayor comprensión de las medidas de accesibilidad. Los debates sobre accesibilidad en la literatura académica suelen ser muy técnicos, dejando de lado las implicaciones operativas y de planificación que conlleva el uso de dichas medidas. Este enfoque orientado a la accesibilidad podría desempeñar un papel fundamental en la planificación de las ciudades latinoamericanas.

### **3. LA ACCESIBILIDAD EN BOGOTÁ**

Bogotá, la capital de Colombia, es una ciudad densa, en comparación con zonas urbanas de población similar de América Latina (Tiznado-Aitken et al., 2023). En 2018, 7.42 millones de personas vivían en 380 km<sup>2</sup>. Alrededor de 16 millones de viajes<sup>1</sup> se hacen cada día (prepandemia) en la ciudad. La Tabla 1 muestra algunas estadísticas descriptivas de la movilidad diaria en Bogotá. La mayoría de los viajes se realizan utilizando modos de transporte activo (aproximadamente el 42% de los viajes diarios) y transporte público (casi el 26% de los viajes). Los segmentos de ingresos más bajos recurren al transporte público

---

<sup>1</sup> Viajes mayores a 3 min.



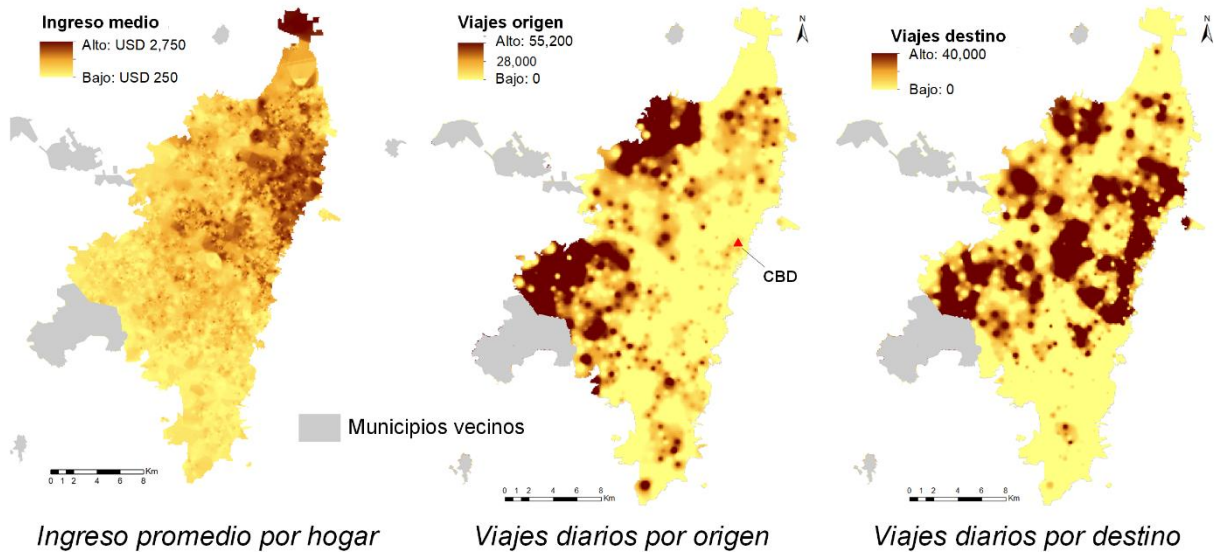
y a los modos activos para sus desplazamientos, mientras que los grupos de mayores ingresos hacen un mayor uso del automóvil. Además, los segmentos de menor ingreso realizan viajes más largos en promedio.

**Tabla 1. Tiempo promedio de viaje, distancias de viaje y reparto modal por ingresos**

Grupo de ingreso	Modo de transporte	Reparto modal (viajes)	Reparto modal (pax-km)	Tiempo viaje prom. (min)	Distancia viaje prom. (km)
Bajo	Caminata	45.4%	25.6%	22.3	4.2
	Transporte público	33.2%	51.4%	90.5	11.5
	Bicicleta	6.6%	4.5%	37.5	6.0
	Carro	5.7%	7.2%	59.2	8.5
	Moto	4.6%	6.3%	51.8	11.2
	Otros	4.5%	4.9%	59.3	8.1
Medio	Caminata	31.3%	14.7%	22.1	3.5
	Transporte público	32.6%	45.7%	81.5	10.8
	Bicicleta	5.6%	3.9%	38.3	5.8
	Carro	18.9%	21.7%	50.9	7.6
	Moto	5.1%	6.4%	46.4	9.9
	Otros	6.5%	7.6%	56.8	8.6
Alto	Caminata	21.6%	9.5%	21.1	2.6
	Transporte público	21.5%	27.7%	71.6	9.4
	Bicicleta	3.4%	3.0%	33.5	5.3
	Carro	42.2%	46.4%	44.5	7.1
	Moto	2.7%	3.2%	41.8	8.9
	Otros	8.6%	10.2%	53.2	8.6

Las brechas de movilidad y accesibilidad en la ciudad son evidentes entre las poblaciones de bajos y altos ingresos, que suelen vivir en la periferia y el borde oriental, respectivamente (Guzman et al., 2017b; Guzman y Bocarejo, 2017). Debido al proceso histórico de urbanización de la ciudad, la periferia urbana no cuenta con oferta suficiente de empleo, instalaciones educativas y de salud y otros equipamientos urbanos (Guzman et al., 2017a). Esta estructura urbana afecta negativamente en mayor medida a los residentes más pobres de la ciudad, que se ven obligados a realizar viajes durante largos periodos y a gastar gran parte de sus ingresos en sus desplazamientos diarios (Guzman y Oviedo, 2018). El patrón de viajes es pendular (periferia-centro-periferia), siendo el borde oriente el de mayor atracción de viajes, ya que concentra la mayor parte del empleo, tal como se muestra en la Figura 1. En esta figura también muestra la ubicación del Distrito Central de Negocios (CBD,

por sus siglas en inglés), que corresponde a la zona de mayor concentración de empleo y hogares con mayores niveles de ingresos (Peña et al., 2022).



**Figura 1. Ingresos de los hogares, generación/atracción de viajes diarios obligatorios**

Estos patrones de viaje implican una distribución desigual de los niveles de accesibilidad, en particular para los usuarios del transporte público, que pertenecen principalmente a las categorías socioeconómicas más bajas de la ciudad (estratos socioeconómicos, ESE, 1 a 3) y que viven en la periferia. El ESE es una clasificación del suelo residencial entre 1 y 6, donde 1 corresponde a las zonas de menor calidad urbana y 6 a las de mayor, y se suele utilizar como aproximación al nivel de renta promedio de los hogares (Cantillo-García et al., 2019). Estas brechas han existido por décadas en la ciudad y, en algunos casos, se han agudizado debido a que la población de menores ingresos no puede acceder a una vivienda dentro de Bogotá y, por lo tanto, debe desplazarse a municipios aledaños. Para efectos de un análisis espacial y una presentación más clara de los resultados, Bogotá se divide en 112 unidades de planeación zonal (UPZ), que son unidades territoriales utilizadas para planificar el desarrollo urbano y siguen límites reconocibles como vías y barreras naturales.

La accesibilidad en Bogotá ha sido estudiada previamente por un número creciente de investigadores a lo largo de los años (Arellana et al., 2021; Bocarejo y Oviedo, 2012; Guzman et al., 2018, 2017b; Guzman y Oviedo, 2018) resaltando las desigualdades

descritas anteriormente a través de diferentes mecanismos. La mayoría de estos estudios utilizaron medidas de accesibilidad potencial y de contorno, que se adaptan mejor como instrumentos de diagnóstico, y son difíciles de comparar en determinados contextos. Además, estas medidas no necesariamente proporcionan una forma directa de estimar los cambios en la accesibilidad debido a las cambiantes condiciones urbanas.

En este contexto, los gobiernos nacional y local lanzaron un ambicioso plan de infraestructura de transporte para el año 2035, que consiste en inversiones millonarias en la construcción y ampliación de la red vial regional, la mejora de las vías de acceso a Bogotá y la construcción de más teleféricos y corredores BRT, las dos primeras líneas de metro y trenes regionales. Sin embargo, este plan sigue centrándose en gran medida en permitir la movilidad frente al acceso. Dada la escala y el propósito del plan propuesto, este caso presenta un campo de pruebas apropiado para el uso de medidas de accesibilidad basadas en la utilidad.

#### **4. METODOLOGÍA**

Para estimar la accesibilidad basada en la utilidad, se propone un modelo MNL. Este modelo considera la utilidad de usar una alternativa como modo de transporte, dados los atributos del viaje y las características del viajero. A continuación, el modelo MNL se vincula al concepto de excedente del consumidor (Niemeier, 1997). Esto permite estimar los beneficios netos esperados de los viajeros monetizando el excedente del consumidor utilizando el parámetro del costo y los valores subjetivos del tiempo, los cuales se obtienen del modelo de elección. Los costos y tiempos de viaje de los escenarios se estiman utilizando un modelo de transporte clásico de cuatro etapas.

Desde el punto de vista del bienestar en el transporte, las inversiones en infraestructura y en servicios de transporte público pueden reducir los costos de viaje, al menos en el corto plazo. Además, puede haber beneficios para los viajeros existentes y para nuevos viajeros atraídos por dicha reducción de costos. El excedente del consumidor es fácil de estimar cuando se asume que la función de demanda es lineal. La función de demanda de la Figura 2 intercepta las funciones de costo marginal ( $S_x$ ). La función de oferta actual ( $S_0$ ) mejora al implementarse políticas o proyectos como la ampliación de la capacidad de una red o la construcción de nueva infraestructura. En este caso, la curva de oferta se desplaza hacia

abajo ( $S_1$ ) y la curva de demanda se cruza en un nuevo precio de equilibrio  $P_1$ , inferior a  $P_0$ , lo que da lugar a un aumento de la demanda de  $Q_0$  a  $Q_1$ . Los beneficios percibidos por los viajeros existentes y los nuevos, entre  $S_0$  y  $S_1$ , son iguales al polígono sombreado de la Figura 2, cuyo valor suele calcularse utilizando la regla de la mitad (Tressider et al., 1968). Este beneficio o bienestar se denomina excedente del consumidor.

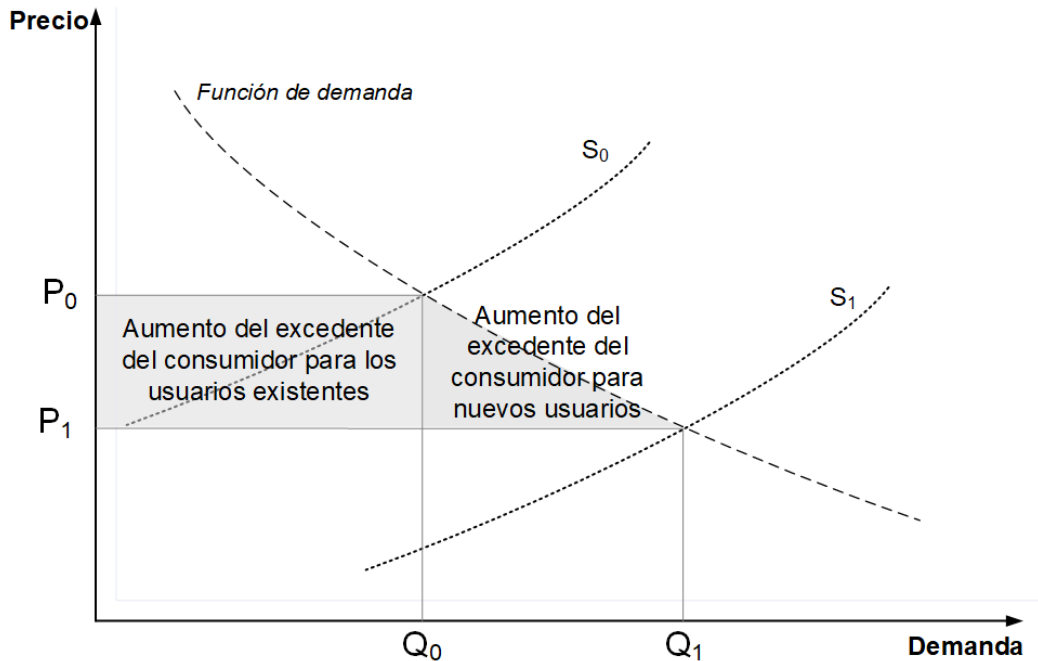


Figura 2. Excedente del consumidor

Sin embargo, las funciones de demanda de viaje no suelen ser lineales. En este sentido, un enfoque ampliamente reconocido para evaluar la demanda de viaje son las técnicas de elección discreta (Ortúzar y Willumsen, 2011). Los modelos de elección discreta evalúan la probabilidad de seleccionar una alternativa entre un conjunto finito de opciones disponibles, teniendo en cuenta las características del viajero y los atributos relacionados con las alternativas y el contexto. Estos métodos también proporcionan un marco robusto para estimar los patrones de sustitución, como la disposición a pagar y las medidas de cambio de bienestar, lo que permite la evaluación de los efectos distributivos mediante la captura de la heterogeneidad de las preferencias teniendo en cuenta los diferentes segmentos de

población. Para observar los efectos distributivos, se desagregaron los resultados por sexo, ocupación y nivel de renta.

Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio busca evaluar los cambios en el excedente del consumidor utilizando métodos de elección discreta en escenarios hipotéticos de nuevas infraestructuras de transporte en Bogotá. Para ello no se utiliza la conocida regla de la mitad, ya que existe consenso en que los modelos de elección discreta ofrecen una mejor alternativa. Aunque la regla de la mitad se utiliza comúnmente en la evaluación de proyectos debido a su facilidad para calcular el excedente del consumidor, las estimaciones basadas en modelos de elección discreta proporcionan mejores resultados (Cherchi y Polak, 2005). Las diferencias entre la regla de la mitad y los modelos de elección aumentan en escenarios donde las diferencias en los costos de viaje son mayores, lo que sugiere que la regla de la mitad puede sobreestimar los cambios en el excedente del consumidor. Esto se debe principalmente a que la regla de la mitad asume que la demanda es lineal con respecto a los costos, mientras que los métodos logsum permiten una evaluación de las funciones de demanda para diferentes individuos. Sin embargo, si se supone que la demanda es lineal en el modelo de elección, los resultados serán similares en comparación con la regla de la mitad, ya que se supone que las preferencias son homogéneas (de Jong et al., 2007; Ma et al., 2015).

#### **4.1 Modelos de elección discreta y excedente del consumidor**

Basados en la teoría económica RUM, los métodos de modelación de elección discreta asumen que quien elige es un agente racional que selecciona la alternativa que maximiza su utilidad (McFadden, 2001). El concepto de utilidad puede asociarse a la satisfacción o los beneficios que obtiene el individuo al acceder al servicio seleccionado. Entonces, el excedente del consumidor (EC en adelante) en una situación de elección, se refiere a la máxima utilidad percibida por quien realiza la elección. En otras palabras, el EC representa la diferencia entre la disposición a pagar y el costo generalizado del viaje de las alternativas (es decir, el presupuesto sobrante en la situación de elección). Esto se representa mediante la Ecuación 1, donde  $\alpha_i$  es la utilidad marginal del ingreso y  $U_{ij}$  se refiere a la utilidad que el individuo  $i$  obtiene de una determinada alternativa de transporte  $j$ . Nótese que  $U_{ij}$  comprende una utilidad sistemática observada por el modelador ( $V_{ij}$ ) y un componente de error aleatorio ( $\varepsilon_{ij}$ ) asociado al componente desconocido. La utilidad sistemática suele representarse como

una combinación lineal de atributos observados y un conjunto de parámetros a estimar. Por lo tanto, el excedente del consumidor esperado podría calcularse mediante la Ecuación 2 (Train, 2009).

$$EC_i = \frac{1}{\alpha_i} \max_j (U_{ij}) \quad (1)$$

$$E(EC_i) = \frac{1}{\alpha_i} E[\max_j (V_{ij} + \varepsilon_{ij})] \quad (2)$$

Bajo los supuestos del logit multinomial,  $\varepsilon_{ij}$  se supone independiente e idénticamente distribuido (IID) Gumbel, la utilidad es lineal con los ingresos y la probabilidad de elegir la alternativa  $j$  de un conjunto  $N$  de alternativas disponibles viene dada por la Ecuación 3. Puede demostrarse que el valor esperado de la utilidad máxima percibida por el tomador de decisiones puede expresarse como en la Ecuación 4, una formulación conocida como logsum, donde  $C$  es una constante desconocida relacionada con el hecho de que la utilidad absoluta no puede medirse (Williams, 1977). Suponiendo que  $C$  es constante en todos los escenarios, la Ecuación 4 se utiliza para evaluar los cambios en el excedente del consumidor mediante la estimación de la diferencia, tal como se ve en la Ecuación 5. Nótese que esta formulación permite estimar el cambio neto del excedente del consumidor entre escenarios, representado como el polígono sombreado de la Figura 2.

$$P_{ijk} = \frac{e^{V_{ij}}}{\sum_{j \in N} e^{V_{ij}}} \quad (3)$$

$$E(EC_i) = \frac{1}{\alpha_i} \ln(\sum_j e^{V_{ij}}) + C \quad (4)$$

$$\Delta E(EC_i) = \frac{1}{\alpha_i} \left[ \ln(\sum_j e^{V_{ij}^{después}}) - \ln(\sum_j e^{V_{ij}^{antes}}) \right] \quad (5)$$

El excedente del consumidor estimado mediante diferencias logsum en términos monetarios se refiere a la cantidad necesaria para compensar a los individuos por soportar el cambio de política evaluado (Zhao et al., 2012). En cuanto a la utilidad marginal del ingreso ( $\alpha_i$ ), se estima como el negativo del parámetro de una variable de costo incluida en la utilidad sistemática del modelo de elección discreta. Por definición, el parámetro asociado al atributo de costo es la utilidad marginal del costo, que es el inverso de la utilidad marginal

del ingreso, ya que una reducción del costo equivale a un aumento igual del ingreso (Train, 2009).

La Ecuación 3 se basa en gran medida en asumir que la utilidad marginal del ingreso es constante. Si no es así, se necesita una formulación más compleja. Afortunadamente, esto no es un problema cuando se evalúan los cambios en el excedente del consumidor en relación con el ingreso, generado por la mayoría de las políticas de transporte urbano y las inversiones en infraestructura, ya que estos son relativamente pequeños en comparación con el ingreso individual y la utilidad marginal podría suponerse constante en todo el rango de cambios implícitos generados por la política evaluada (Train, 2009).

## **4.2 Especificación del modelo de elección**

Los cambios del EC se estiman usando la Ecuación 5 y la accesibilidad usando la Ecuación 7, la cual está asociada con los modos de transporte disponibles del caso de estudio, asumiendo que el destino del viaje cambia de acuerdo con los cambios en el uso del suelo. El MNL combina datos de preferencias reveladas (PR), una encuesta de preferencias declaradas (PD), herramientas SIG y datos de tiempos de viaje. El conjunto de datos de PD incluye dos nuevas alternativas de transporte. Los datos de PR se complementan con datos obtenidos mediante herramientas SIG y la API *Distance Matrix de Google* (Guzman et al., 2021). El modelo de elección modal se estimó utilizando datos de las PR y PD, aplicando el paradigma de enriquecimiento de datos (Louviere et al., 2000). El enfoque de datos combinados permite la evaluación de las preferencias de nuevas alternativas en Bogotá (metro y tren) a través del componente de PD, mientras que captura el comportamiento actual de los viajeros (caminar, bicicleta, automóvil, motocicleta, bus y BRT) con la parte de PR, reduciendo el sesgo asociado con la naturaleza hipotética de los datos de PD.

Los datos de PR provienen de la Encuesta de Movilidad de 2015, mientras que los datos de la PD provienen de un experimento de elección utilizado para calibrar las tarifas de transporte público en 2018. Una característica interesante del conjunto de datos de PR, es que los atributos para las alternativas no elegidas se determinaron utilizando la API *Distance Matrix de Google* para los modos motorizados, así como herramientas SIG con algoritmos de ruta mínima para estimar los tiempos de viaje para los modos activos. Este modelo conjunto incluye las alternativas automóvil, motocicleta, transporte público (bus,

BRT, metro y tren), caminar y bicicleta. Las alternativas metro y tren sólo están disponibles en el conjunto de datos de PD, mientras que los desplazamientos a pie y en bicicleta sólo están en la PR. El resto de modos son comunes en ambas fuentes de datos. Este enfoque de datos mixtos permite modelar todas las alternativas de manera conjunta. Nótese que el metro y el tren sólo están disponibles en los escenarios proyectados. Las funciones de utilidad del modelo incluyen variaciones sistemáticas del gusto para capturar la heterogeneidad de las preferencias. Específicamente, el modelo planteado incluye interacciones de la constante con el sexo para las alternativas de transporte público, el costo del viaje con la ocupación y el tamaño del hogar y el tiempo de viaje con el nivel de ingreso. También note que el nivel de ingreso se incluye como variable categórica porque los datos disponibles se clasifican por rangos de ingreso. La forma general de las funciones de utilidad sistemática  $V_{ij}$  percibida por el individuo  $i$  para la alternativa  $j$  se describe en la Ecuación 6:

$$V_j = ASC_j + (\beta_c + \beta_{c-NO} \cdot NO + \beta_{c-HS} \cdot HS) \cdot C_j + (\beta_t + \beta_{t-LI} \cdot LI + \beta_{t-HI} \cdot HI) \cdot T_j + \beta W_j \cdot W \cdot TP_k + \delta \quad (6)$$

Donde  $\beta$  es el conjunto de parámetros a estimar.  $ASC$  es la constante específica para cada modo de transporte  $j$ .  $NO$  es una *dummy* que toma el valor de 1 si el individuo no trabaja ni estudia (es decir, no está ocupado).  $HS$  es una *dummy* que toma el valor de 1 si el hogar está compuesto por más de tres personas.  $LI$  y  $HI$  son variables *dummy* que toman el valor de 1 si el individuo pertenece a un nivel de renta bajo o alto, respectivamente.  $W$  es una *dummy* que toma el valor de 1 si el individuo es mujer.  $TP$  es una *dummy* que toma el valor de 1 si la alternativa es una de las  $k$  alternativas de transporte público (bus, BRT, metro o tren).  $C_j$  y  $T_j$  son el costo y el tiempo de viaje del modo de transporte  $j$ , respectivamente. Y  $\delta$  es un componente de error aleatorio que varía entre los individuos, pero es fijo en las observaciones repetidas y que se incorpora para tener en cuenta la estructura de panel de los datos.

Esta función de demanda permite desagregar los resultados teniendo en cuenta las variaciones sistemáticas de gusto según el modo de transporte utilizado, el sexo, la ocupación, el tamaño del hogar y el nivel de ingreso. Este último se categorizó en tres niveles: los ingresos bajos corresponden al 20% más bajo, y los ingresos altos al 20% más alto, según la distribución de la renta per cápita de los hogares de la ciudad. También se



dividió la muestra en ocupados (es decir, trabajadores y estudiantes) y el resto (no ocupados).

### 4.3 Estimación de la accesibilidad

El logaritmo de la Ecuación 5 muestra el beneficio esperado del viajero en una formulación MNL y se conoce como logsum. La Ecuación 7 muestra el logsum como medida de accesibilidad ( $A_i$ ) para un viaje específico del individuo  $i$ , donde  $\mu$  es el factor de escala asociado a la varianza del término de error en el marco logit. Se asumió  $\mu$  igual a 1 para efectos de identificación, ya que no puede estimarse por separado de los parámetros del modelo incluidos en la función de utilidad (Ortúzar y Willumsen, 2011). Nótese que  $A_i$  es la utilidad máxima esperada de la situación de elección y puede transformarse en unidades monetarias dividiéndola por el parámetro del costo, resultando en una formulación análoga a la Ecuación 4. La accesibilidad individual promedio por viaje a todas las oportunidades que ofrece la ciudad puede agregarse entre individuos mediante el promedio de los viajes realizados por ellos (así como por grupos), ya sea espacialmente o por segmentos de población, calculando el promedio ponderado sobre los individuos, donde las ponderaciones reflejan la proporción de viajes realizados por individuos con la misma utilidad representativa (Zhao et al., 2012).

$$A_i = \frac{1}{\mu} \ln(\sum_j e^{\mu V_{ij}}) \quad (7)$$

En este caso, la accesibilidad se estima a partir de la Ecuación 7 utilizando el modelo MNL descrito anteriormente, en donde el término  $V_{ij}$  se refiere a las utilidades sistemáticas de la alternativa de transporte  $j$  disponible para un individuo  $i$  para un viaje específico (Ecuación 6). La accesibilidad basada en la utilidad también puede considerarse una medida de la accesibilidad “experimentada”, ya que se calcula con información de los viajes realizados por los individuos y tiene en cuenta las preferencias de modo. Estos viajes son los reportados en la Encuesta de Movilidad de Bogotá 2019. Estas oportunidades están relacionadas con el trabajo, el estudio, la atención en salud, las compras, el ocio, comer/beber fuera, el ocio, la cultura y las diligencias en toda la ciudad. Además, la medida de accesibilidad de la Ecuación 7 tiene la misma escala y unidades (“útiles”) de las funciones de utilidad. Aunque se trata estrictamente de una escala ordinal, el marco RUM

permite atenuar este requisito y tratarla como una variable cardinal con fines prácticos (Batley, 2008).

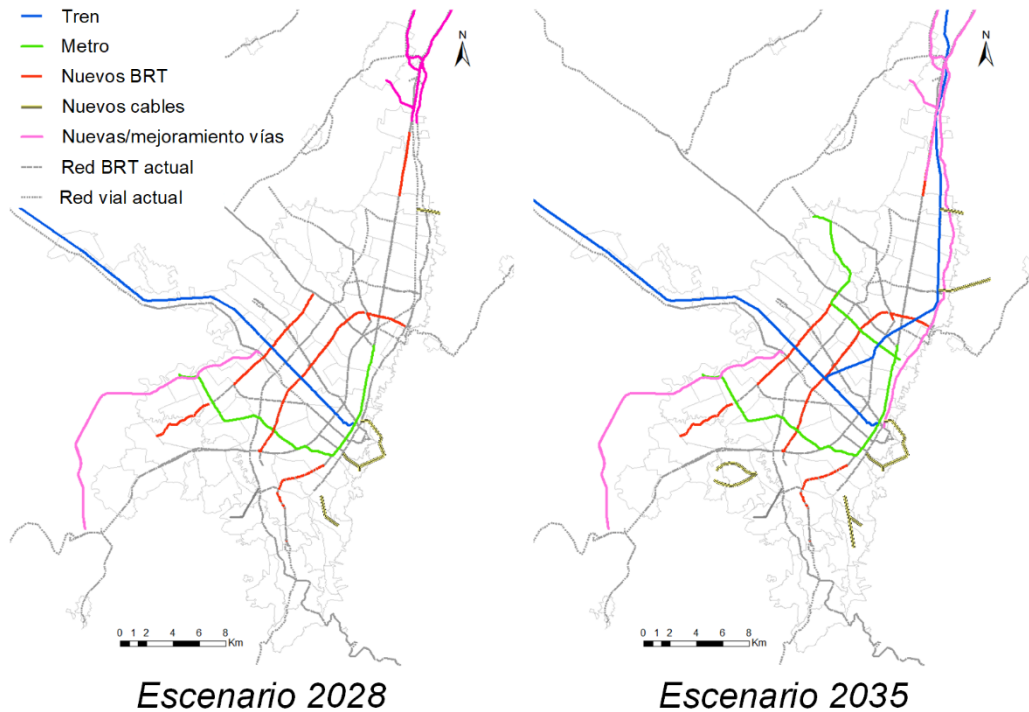
Nótese que las utilidades y la medida de accesibilidad también pueden tomar valores negativos. Por un lado, esto se debe a que sólo se observa una parte de la utilidad. Por otro lado, si se supone que la demanda de transporte es una demanda derivada y la función de utilidad se especifica para captar la “desutilidad” que experimenta el viajero, la utilidad podría incluir valores negativos. Es importante mencionar que un valor puntual de la accesibilidad basado en la utilidad proporciona poca información, ya que se desconocen la escala y la magnitud reales de la utilidad. Sin embargo, puede utilizarse para comparar la accesibilidad experimentada entre segmentos de población (o zonas), suponiendo que el componente no observado de la utilidad es igual y considerando que una medida más alta significa mayor accesibilidad.

#### **4.4 Evaluación de escenarios**

Para probar la metodología propuesta, se simulan y analizan dos escenarios hipotéticos para estimar los cambios en la accesibilidad a partir de un escenario base de 2019. Estos escenarios representan los planes de construcción de infraestructuras previstos en la zona de estudio en dos horizontes temporales. Los escenarios considerados en esta investigación y sus características se resumen a continuación y en la Figura 3.

- Escenario base 2019. Hay 114.4 km de corredores BRT, que cubren sólo Bogotá y Soacha (un municipio vecino al sur) y un sistema de cable aéreo (TransMiCable, ver Guzmán et al. (2023)). La red vial de Bogotá comprende 13,970 km-carril con altos niveles de congestión. Actualmente en el área de estudio, el transporte público sólo incluye el sistema BRT y buses regulares.
- Escenario 2028: La primera línea de metro entra en funcionamiento. Incluye dos nuevos corredores BRT (+24.4 km), el tren regional de occidente y cuatro nuevas líneas de cables. En cuanto a nuevas infraestructuras para tráfico mixto, hay una carretera perimetral al occidente, una mejora de capacidad de los accesos al norte de la ciudad y mejoras en varios corredores al sur de la ciudad, como se muestra en la Figura 3 a la izquierda.

- Escenario 2035: Además de los proyectos del escenario anterior, se incluyen proyectos de transporte público e infraestructura vial, como el Corredor Verde de la Carrera 7 (la vía más emblemática de la ciudad), la segunda línea de metro, más líneas de cable, el tren regional del norte y otra ampliación de los accesos viales del norte (ver Figura 3 a la derecha).



**Figura 3. Escenarios propuestos**

Para evaluar estos escenarios, se estimó la demanda de viaje para los años horizonte de cada uno. Dado que este enfoque de accesibilidad tiene como objetivo apoyar los procesos de toma de decisiones y planificación de los gobiernos locales y regionales, la generación y atracción de viajes se hizo utilizando una versión actualizada del modelo de Interacción entre Uso del Suelo y Transporte de Bogotá (Guzman, 2019). Estos resultados consisten en vectores que generan la distribución de viajes entre los pares Origen-Destino, la elección modal y la asignación de viajes en la red considerando los cambios de uso del suelo a lo largo del tiempo. La estimación final de la demanda diaria de viajes es de 18.2 millones de

viajes/día en 2028 y 19.7 millones de viajes para 2035. A continuación, se evalúan los efectos del EC y la distribución por segmentos de población y zonas.

Las diferencias del EC entre escenarios se estimaron y agregaron de dos maneras: una, mediante el promedio por segmentos de población y la otra, usando el promedio por zona (UPZ). Es relevante mencionar que la disponibilidad de modos privados corresponde a la tasa de motorización reportada en la Encuesta de Movilidad 2019. Por otro lado, la disponibilidad de las alternativas de transporte público (bus, BRT, metro y tren) se estimó mediante procedimientos SIG, uniendo la zona de origen y la disponibilidad de estaciones y paraderos. Por último, la bicicleta y la caminata están disponibles para viajes de menos de 10 y 5 km, respectivamente.

## **5. RESULTADOS**

Los resultados se derivan de la evaluación cuantitativa de los efectos distributivos de los cambios en el bienestar de los viajeros en Bogotá para los escenarios anteriormente planteados. Se estimó la accesibilidad basada en la utilidad (Ecuación 7) y el cambio del EC entre escenarios (Ecuación 5), asociado a los cambios en las alternativas de modos de transporte disponibles. En el caso de la Ecuación 5, el valor de  $\alpha_i$  corresponde al negativo del parámetro de costo estimado en el modelo de elección (ver Tabla 2), mientras que para la Ecuación 7, el factor de escala  $\mu$  se normaliza a 1 para fines de identificación (Ortúzar y Willumsen, 2011; Train, 2009). Dado que las funciones de utilidad  $V_{ij}$  de los distintos modos en ambas ecuaciones dependen de las preferencias del viajero, tiene un componente de valoración subjetiva que podría interpretarse como la percepción individual de sus viajes.

Los resultados de la estimación del modelo mixto PR-PD se presentan en la Tabla 2. Nótese que el modelo se estimó siguiendo el paradigma de enriquecimiento de datos (Louviere et al., 2000), aunque también se estimaron por separado los modelos PD y PR para comprobar la existencia de parámetros comunes. Los modelos separados no se presentan por la simplicidad del estudio, pero pueden consultarse en Guzman et al. (2021). Para abordar la diferencia en la escala de los conjuntos de datos de PR y PD tras el paradigma de enriquecimiento de datos, se fijó la escala para el parámetro de PR en 1 y se estimó un valor para el componente de PD, ya que sólo la relación de ambas escalas es estimable (Louviere et al., 2000). Luego, los parámetros específicos de los conjuntos de datos de PD

(es decir, ASC para tren y metro y la interacción del tiempo de viaje con ingreso bajo) deben multiplicarse por el factor de escala correspondiente asociado al conjunto de datos de PD al utilizarlos en las funciones de utilidad, para transformarlos en el dominio de PR.

**Tabla 2. Resultados del modelo de elección modal PR-PD**

Parámetro		Modelo mixto RP-SP	
		Coefficiente	t-test
ASC Tren (SP)	$ASC_{tren}$	0.82	4.66
ASC Metro (SP)	$ASC_{metro}$	1.92	8.37
ASC Moto (RP)	$ASC_{moto}$	-1.30	-12.26
ASC BRT (RP)	$ASC_{BRT}$	-0.93	-10.48
ASC Bicicleta (RP)	$ASC_{bicicleta}$	-2.42	-22.24
ASC Caminata (RP)	$ASC_{caminata}$	0.27	3.02
Costo	$\beta_c$	-0.14	-8.97
Interacción Costo:No-ocupado	$\beta_{c-NO}$	-0.04	-1.89
Interacción Costo:Tamaño del hogar	$\beta_{c-HS}$	-0.06	-4.48
Tiempo	$\beta_t$	-0.02	-13.11
Interacción Tiempo:Bajo ingreso (SP)	$\beta_{t-LI}$	0.01	8.59
Interacción Tiempo:Alto ingreso	$\beta_{t-HI}$	-0.03	-8.87
Mujer: BRT	$\beta_{w-BRT}$	-0.51	-5.64
Mujer: Bus	$\beta_{w-bus}$	-0.65	-9.33
Mujer: Tren (SP)	$\beta_{w-tren}$	-0.82	-6.16
Mujer: Metro (SP)	$\beta_{w-metro}$	-0.47	-4.09
Efecto Panel Desviación St. $\delta$		1.72	12.42
Factor de escala para los datos SP		1.05	12.56
Log-Likelihood		-21,357.81	
Rho <sup>2</sup> Ajust.		0.308	

Elaboración propia a partir de Guzman et al. (2021).

En cuanto a los resultados de la estimación, todos los parámetros son estadísticamente significativos en el intervalo de confianza del 95% y las estimaciones siguen las teorías de comportamiento, como la utilidad marginal negativa para el costo y el tiempo de viaje, una valoración creciente del tiempo de viaje a medida que aumenta el ingreso y una menor utilidad marginal del costo para los usuarios no ocupados.

Considerando los parámetros del modelo de elección modal, la Tabla 3 incluye los valores subjetivos del tiempo (VOT) por grupo de ingreso y ocupación, de acuerdo con las variaciones sistemáticas para el tiempo de viaje y el costo considerado en la formulación MNL, ya que el modelo sólo considera interacciones para el tiempo de viaje con el grupo de ingreso y el costo de viaje con la ocupación y el tamaño del hogar (véase la Ecuación 6). Nótese que el VOT puede considerarse como la disposición a pagar por una unidad de

ahorro de tiempo de viaje. El VOT aumenta con los ingresos y para los ocupados, como se espera, de acuerdo con los supuestos de comportamiento y microeconomía.

**Tabla 3. Valores subjetivos del tiempo (VOT)**

Segmento			VOT (USD/h)
Grupo de ingreso	Ocupación	Tamaño del hogar	
Bajo	Ocupado	≤ 3	1.6
		>3	1.1
	No ocupado	≤ 3	1.3
		>3	1.0
Medio	Ocupado	≤ 3	3.4
		>3	2.4
	No ocupado	≤ 3	2.7
		>3	2.1
Alto	Ocupado	≤ 3	7.2
		>3	5.2
	No ocupado	≤ 3	5.8
		>3	4.4

1 US Dólar = 3,280 COP en 2019

Los atributos de transporte utilizados en el análisis para los diferentes escenarios provienen de un modelo de Interacción de Uso del Suelo y Transporte (LUTI, por sus siglas en inglés) (Guzman, 2019). Este modelo permite evaluar los cambios de usos del suelo y localización de actividades a lo largo del tiempo, considerando la oferta de transporte y las regulaciones de uso del suelo. Los atributos de costo y tiempo de viaje para la evaluación de los escenarios provienen de un modelo de transporte de cuatro pasos calibrado en el marco del modelo LUTI. También se utilizó la Encuesta de Movilidad de Bogotá 2019. Usando estas herramientas, datos y los resultados del modelo de elección modal descritos en la Tabla 2, se estimó la accesibilidad basada en la utilidad (logsum) para cada viaje. Luego, se estimó el EC entre escenarios y se agregó de dos maneras: por segmentos de población y por zona (UPZ).

El cálculo del EC (Ecuación 5) y la accesibilidad (Ecuación 7) tienen en cuenta la disponibilidad de modos para cada individuo. Las alternativas de transporte privado motorizado (es decir, automóvil y moto) sólo están disponibles si se declaran en la encuesta, el BRT, el metro y el tren están disponibles si el origen o el destino del viaje está a menos

de 600 m de una estación, el bus siempre está disponible, ya que la red cubre toda la zona de estudio, mientras que caminar está disponible para viajes inferiores a 5 km y la bicicleta, para viajes inferiores a 10 km.

La Figura 4 muestra la distribución de la accesibilidad promedio desglosada por segmento de población para el escenario base. Los individuos con mayores ingresos y aquellos ocupados perciben una menor accesibilidad en comparación con los viajeros no ocupados y de bajos ingresos. En otras palabras, los individuos más ricos y ocupados experimentan una mayor desutilidad de sus viajes, lo que se relaciona con mayores valoraciones del tiempo de viaje en comparación con los otros segmentos, como se ve en la Tabla 3. En línea con la Encuesta de Movilidad 2019, la distancia promedio recorrida disminuye con respecto a los ingresos para todos los modos de transporte.

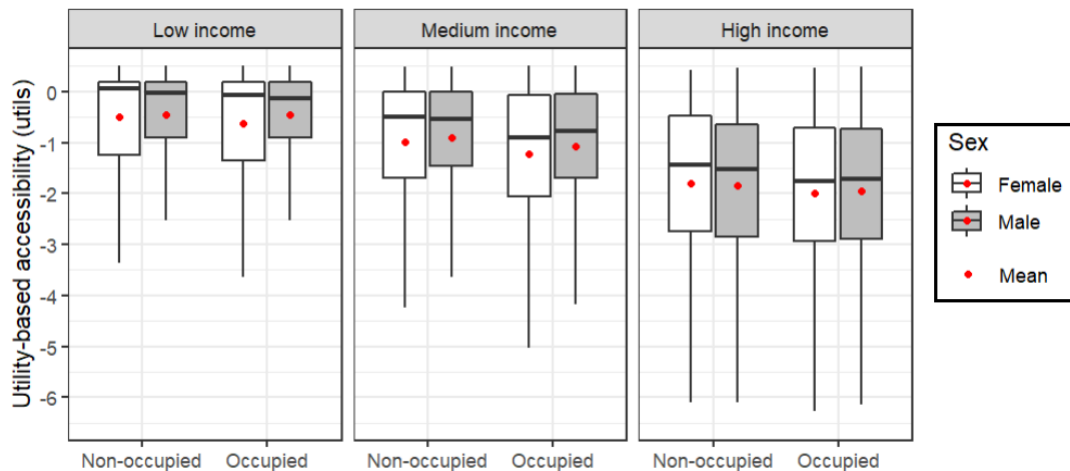


Figura 4. Distribución de la accesibilidad basada en la utilidad por segmento de población (2019)

En los segmentos de ingresos bajos y medios, la distribución de la accesibilidad para las mujeres tiende hacia valores inferiores en comparación con los hombres, especialmente para los segmentos de población ocupada (véase la Figura 4). En el segmento de ingreso bajo, la accesibilidad media para mujeres y hombres es de -0.59 y -0.45 (la diferencia de medias es estadísticamente significativa con un p-value <0.01), mientras que en el grupo de ingreso medio, los valores medios son -1.28 y 1.13, respectivamente (p-value <0.01). No hay diferencias significativas en el grupo de ingresos altos. En promedio, las mujeres

experimentan una menor accesibilidad, de -1.09, en comparación con los hombres, que tienen un -1.02 (p-valor <0.01). Algunas de estas diferencias se explican por el hecho de que las mujeres experimentan una mayor desutilidad en el transporte público, lo que puede estar asociado a mayores niveles de inseguridad e incomodidad. Este efecto se recoge en el modelo de elección modal a través del término de interacción que afecta a la utilidad de las alternativas para las mujeres con respecto a los hombres. Además, para reducir costos, a medida que disminuyen los ingresos, los viajeros suelen intercambiar tiempo, prefiriendo alternativas más asequibles como el transporte público o los modos activos, que suelen tener tiempos de viaje más elevados. En esta línea, los usuarios ocupados tienen mayores expectativas hacia los servicios de transporte y mayores valores subjetivos del tiempo, lo que se traduce en funciones de utilidad más costosas. Teniendo en cuenta lo anterior, las diferencias de accesibilidad por sexo, ocupación e ingresos están relacionadas con las diferencias en las preferencias por el transporte público y su nivel de uso.

La interpretación de la medida de accesibilidad aquí usada plantea varios retos. En primer lugar, las unidades (“útiles”) pueden considerarse una escala subjetiva para medir la utilidad experimentada por el responsable de la elección, lo que dificulta su interpretación y comunicación. Esto se supera transformando las utilidades en términos monetarios dividiendo el valor de utilidad por el coeficiente del atributo asociado. En segundo lugar, al existir un componente no observado en las funciones de utilidad, sólo es posible estimar una parte de la deseabilidad total del conjunto de elecciones. Por estas razones, el valor único de la accesibilidad basada en la utilidad proporciona una información limitada. La comparación de medidas entre segmentos de población requiere asumir que la utilidad no observada es igual entre los segmentos evaluados. Este supuesto puede atenuarse al evaluar las diferencias entre diferentes escenarios, suponiendo que este componente no observado permanece igual entre los segmentos de población (de Jong et al., 2007).

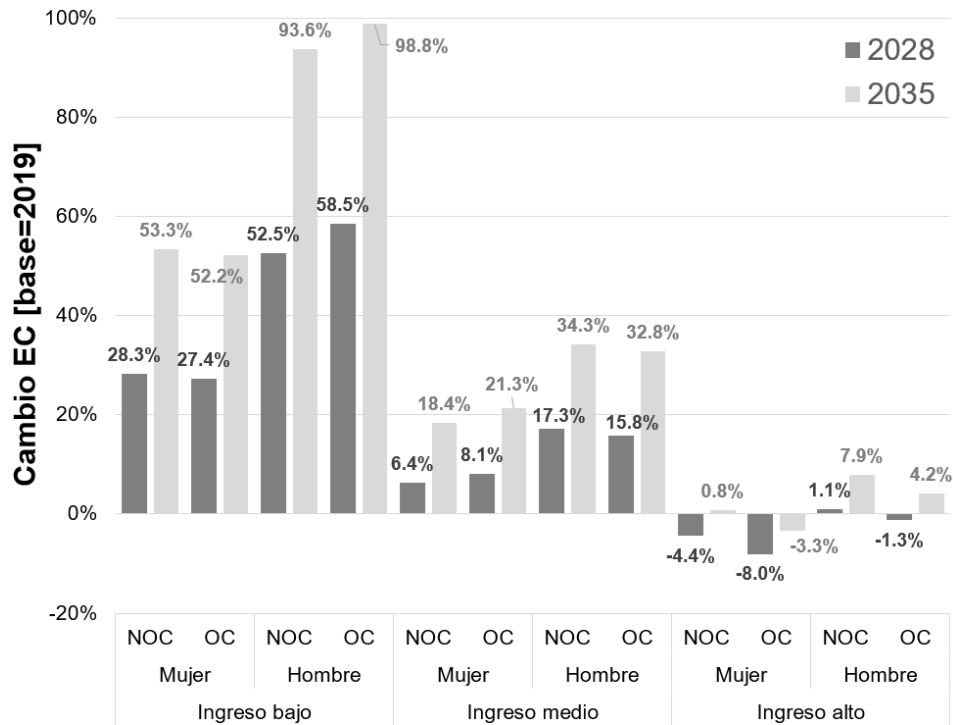
Teniendo en cuenta lo anterior, se evaluaron los cambios del EC entre los escenarios proyectados tras la estimación de la accesibilidad, utilizando la Ecuación 5. El cambio del EC se refiere a la diferencia, en términos monetarios, de los logsum de los escenarios estudiados. Es relevante mencionar que para calcular el EC promedio, se realizó un promedio ponderado del EC experimentado en cada viaje de la Encuesta de Movilidad 2019, donde los pesos son el número de viajes diarios realizados por individuos con la



misma utilidad representativa, es decir, del mismo segmento poblacional. El EC promedio se multiplica por los viajes diarios para obtener el cambio del EC agregado.

Los resultados indican que, en promedio, la nueva inversión en transporte evaluada en los escenarios mejora el EC asociado a la demanda diaria de viajes en Bogotá. El logsum promedio por viaje en 2019 fue de 1.89 USD (6,206 COP), disminuyendo en 13% y 24% para 2028 y 2035, respectivamente. Considerando que el número de viajes diarios en 2019, 2028 y 2035 es de 15.4, 18.2 y 19.7 millones, respectivamente, el cambio agregado de EC en un día típico en 2028 con respecto a 2019 es de alrededor de 4.5 millones USD, y en 2035 comparado con 2028 es de 4.0 millones USD.

Para evaluar los efectos por segmentos de población, se desglosaron los resultados del EC por sexo, ocupación y nivel de ingreso. Estos resultados se resumen en la Figura 5, que muestra el cambio del EC entre los escenarios proyectados y el base. En promedio, la mayoría de los segmentos poblacionales se encuentran en mejor situación en los escenarios proyectados, excepto las mujeres de alto ingreso y los hombres ocupados de alto ingreso en 2028, quienes experimentan un cambio negativo en el EC. Es decir, las mujeres con ingresos altos experimentan que sus viajes son más caros en 2028 y 2035 en comparación con el escenario base. En otras palabras, la conveniencia de sus viajes es menor en los escenarios proyectados.



**Figura 5. Cambio promedio del excedente del consumidor por viaje y por segmento de población (respecto al escenario 2019)**

Los resultados también sugieren diferencias según el nivel de ingresos y la ocupación. Las personas con ingresos bajos y medios, así como los hombres, perciben mayores beneficios. Esto podría deberse a que la nueva infraestructura pretende mejorar el sistema de transporte público con nuevos corredores de BRT, metro y tren que conectan Bogotá con los municipios vecinos del norte y el oeste, donde vive una proporción considerable de la población con ingresos bajos. Sin embargo, la red de carreteras no presenta mejoras importantes. Por lo tanto, el nivel de servicio de los vehículos privados mejora en menor escala que el de los usuarios del transporte público. Esto podría afectar a los usuarios de ingresos altos, que dependen en mayor medida de los vehículos privados, ya que el 41% de sus desplazamientos se realizan en automóvil, frente al 17% en el caso de los ingresos medios y el 4% en el de los ingresos bajos. Además, la proporción de viajes realizados en transporte público es del 31%, 34% y 25% para los segmentos de ingresos bajos, medios y altos, mientras que en el caso de caminar y montar en bicicleta es del 60%, 44% y 34% respectivamente, según la Encuesta de Movilidad 2019.

En cuanto a la distribución espacial de los beneficios, la Figura 6 muestra el cambio promedio del excedente del consumidor entre los escenarios por zona. El EC de cada zona se calcula promediando el cambio individual del EC por viaje, según la distribución de la demanda de viajes de cada zona. Se observan mayores beneficios en las zonas pertenecientes a los corredores que conectan el área del CBD, situada en el extremo oriental (ver la Figura 1 para la localización del CBD), con las zonas situadas al sur y al noroccidente. Estos beneficios están directamente asociados a la implementación de las dos líneas de metro. Las diferencias espaciales en EC también están asociadas a las características socioeconómicas de cada zona. En Bogotá, las zonas con mayor población de residentes de bajos ingresos se encuentran en la periferia, especialmente al sur y al occidente, mientras que los ingresos más altos se concentran al nororient. Teniendo esto en cuenta, la Figura 6 sugiere que las inversiones en nuevos corredores de transporte público tienen como objetivo mejorar la accesibilidad desde las zonas de ingresos bajos y medios.

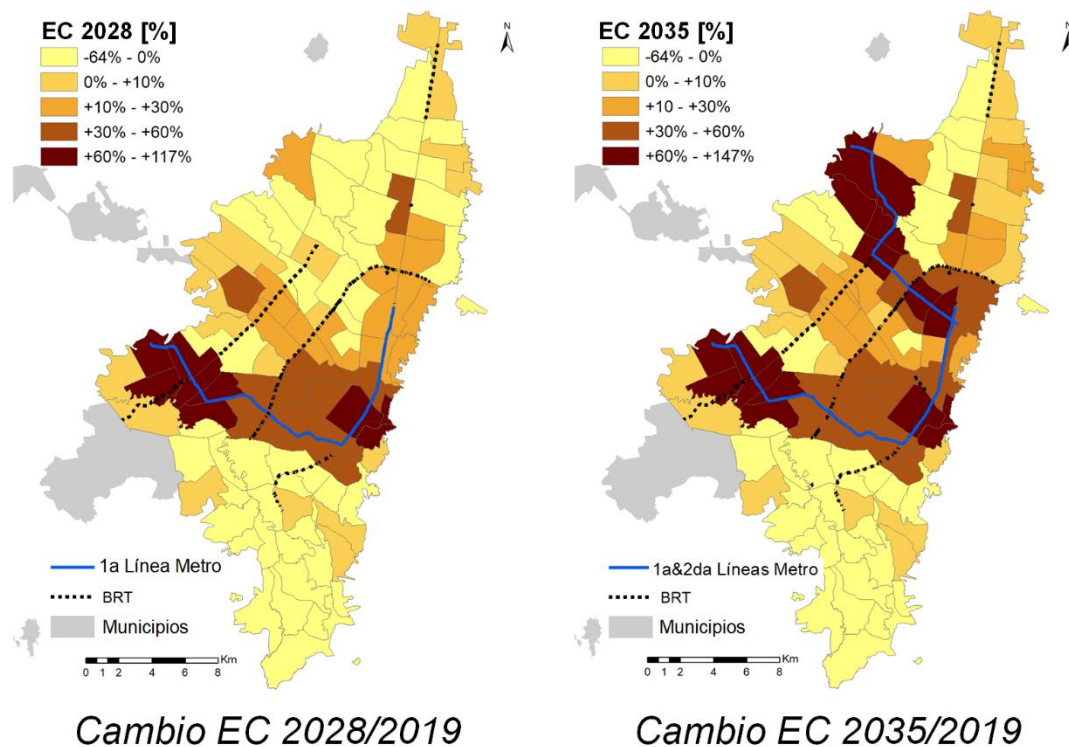


Figura 6. Cambio promedio del EC por viaje y zona de origen (respecto al escenario 2019)

Los resultados del EC también se alinean con el VOT presentado en la Tabla 3. A medida que el VOT aumenta con el ingreso, los individuos experimentan un menor bienestar en su movilidad diaria, a pesar de que los segmentos de mayores ingresos realizan viajes más cortos. De hecho, en Bogotá, la distancia promedio recorrida por los usuarios de ingresos altos en transporte público es de alrededor de 10 km, mientras que para los de ingresos medios y bajos es de 11.3 y 12.2 km, respectivamente. En contraste, para los viajes en automóvil, las distancias promedio son de 7.9, 8.5 y 9.5 km para los segmentos de ingresos altos, medios y bajos, mientras que para los viajes a pie las distancias promedio son de 2.8, 3.4 y 3.7 km, respectivamente.

Como se ha mencionado anteriormente, un mayor VOT implica experimentar una mayor desutilidad en viajes de la misma duración, en comparación con los usuarios con menor VOT. En otras palabras, una unidad de tiempo de viaje ahorrada por un usuario con mayores ingresos tiene una mayor valoración en términos monetarios. Lo mismo ocurre con los individuos ocupados y no ocupados, ya que los primeros tienen un VOT más alto. Esto significa que las diferencias en el EC reflejan las diferencias en la disposición a pagar por parte de los segmentos de población con diferentes funciones de demanda, así como las preferencias hacia las alternativas y atributos de los modos disponibles. Esto sólo ocurre si estas diferencias se tienen en cuenta explícitamente en la especificación de las utilidades en el marco del modelo de elección, ya que la variabilidad de la medida a nivel individual depende de los atributos y los términos de interacción incluidos en el modelo de elección modal. Dado que el EC refleja las diferencias entre la disposición a pagar y el costo de viaje de las alternativas, los resultados sugieren que los principales efectos de las nuevas infraestructuras en los escenarios proyectados benefician principalmente a los segmentos de población con ingresos bajos y medios. Aunque los tiempos de viaje disminuyen en promedio en los escenarios futuros para los segmentos de ingresos altos, especialmente las mujeres ocupadas, se produce un aumento de los costos generalizados en comparación con el escenario base, como se deduce del EC negativo mostrado en la Figura 5.

Las diferencias en la valoración de los beneficios al calcular el EC con medidas de accesibilidad basadas en la utilidad plantean retos a la hora de utilizar estos métodos para la evaluación de proyectos, especialmente cuando se comparan los beneficios para distintos segmentos de población. Aunque la estimación del EC ayuda a capturar los

cambios en el bienestar en el contexto de las evaluaciones de las políticas de transporte, si no se tienen en cuenta las diferencias entre las preferencias y el VOT, podría conducir a una mala orientación de los (escasos) recursos públicos. Esto tiene implicaciones en la planificación del transporte, ya que podría llevar a subestimar los beneficios en las zonas de bajos ingresos. Por lo tanto, es recomendable complementar el análisis costo-beneficio incluyendo evaluaciones que utilicen la valoración de la accesibilidad para diferentes segmentos de población con el fin de minimizar este sesgo. Además, los resultados sugieren que intervenciones similares podrían tener impactos diferentes según las características socioeconómicas de la zona de estudio, y que las infraestructuras de transporte por sí solas pueden no mejorar la condición de los segmentos de bajos ingresos si no se aplican otras medidas, como subsidios al transporte público o reducciones de los costos, para que el transporte sea más asequible.

A pesar de sus dificultades prácticas, los métodos de accesibilidad basada en la utilidad ayudan a capturar las preferencias de los individuos que determinan sus elecciones, lo que puede contribuir al análisis de otros aspectos urbanos como la localización de viviendas y actividades, o explicar el valor del suelo. Esta situación lleva a replantear el concepto de accesibilidad incorporando la heterogeneidad de preferencias y enmarcando el análisis en las teorías del comportamiento individual más allá de los métodos tradicionales basados en la localización y la capacidad vial. Al considerar las preferencias de los distintos segmentos de población a través de interacciones y variaciones sistemáticas del gusto en el estudio de la accesibilidad, es posible diferenciar los aspectos que determinan los gustos y expectativas de cada segmento de población e identificar las necesidades de conectividad de cada grupo.

Nuestro análisis sugiere que la mayor desutilidad que perciben los usuarios de alto ingreso tiene una gran influencia en los viajes cortos. Esto es consecuencia de una mayor valoración del tiempo de viaje y de la mayor disposición a pagar, que se refleja en accesibilidad y en el EC. Por ejemplo, en el caso de viajes similares (es decir, mismo tiempo de viaje, origen, destino y modos disponibles), los usuarios con mayor VOT tienen una percepción más baja de la accesibilidad en comparación con otros usuarios. Además, los resultados también sugieren que los beneficios de bienestar para las poblaciones de

mayores ingresos son menores en comparación con los usuarios de bajos ingresos en los escenarios evaluados.

## **6. ENTENDER LA ACCESIBILIDAD COMO UNA POLÍTICA URBANA**

Los hallazgos de este estudio tienen implicaciones importantes para la planificación y la evaluación de proyectos de transporte. Por un lado, el uso de medidas basadas en la utilidad para el análisis de los efectos diferenciales de las intervenciones en infraestructura y transporte público, añade profundidad y matices a la influencia de las alternativas de transporte de acuerdo con las condiciones socioeconómicas de la población. La incorporación de las preferencias vinculadas a características socioeconómicas en el análisis de la accesibilidad, también ofrece a los profesionales y a los responsables de la toma de decisiones, la oportunidad de usar información relevante sobre la distribución de los beneficios y las condiciones que explican dicha distribución. Los resultados también son coherentes con investigaciones anteriores sobre accesibilidad, donde se sugiere que las personas de mayores ingresos tienen una mayor disposición a pagar por las mejoras de transporte y menores tiempos de viaje (Zhang, 2023). Sin embargo, esta situación podría generar algunos problemas para los responsables de la toma de decisiones, ya que podría conducir a una mala asignación de recursos, puesto que podría ser tentador dar prioridad a los proyectos que benefician a los segmentos de ingresos más altos, considerando que el rendimiento de la inversión puede ser mayor si no se tienen en cuenta otros impactos sociales. Aunque los modelos que incluyen interacciones del valor del tiempo con variables socioeconómicas capturan las diferencias en las preferencias según el segmento de población, también pueden resultar problemáticos, ya que pueden sesgar los beneficios para los usuarios con mayores ingresos. También significa que la provisión de infraestructura de transporte por sí sola podría no generar beneficios significativos para el segmento de menores ingresos si no se consideran otras medidas que garanticen la asequibilidad de los servicios de transporte.

Por otra parte, la accesibilidad convertida en dinero, pueden contribuir a vincular el análisis social de lestarsas intervenciones con los enfoques de evaluación económica de proyectos. Establecer tal conexión tiene implicaciones positivas para cambiar el enfoque del análisis ex ante y la evaluación de la viabilidad de los proyectos de inversión pública, como sugieren investigaciones anteriores (Gulhan et al., 2013). Los métodos ya consolidados, como el

CBA, tienen el potencial de incorporar consideraciones distribucionales similares a las resaltadas en este estudio. Sin embargo, en la práctica, es raro que estos métodos se apliquen centrándose en la distribución de los beneficios. Por lo tanto, sería beneficioso adoptar medidas de bienestar de la accesibilidad en la consideración de los beneficios sociales de los proyectos de transporte en los CBA tradicionales.

Las ventajas prácticas de la accesibilidad basada en la utilidad, son ilustradas por nuestro análisis en el contexto de los planes a mediano y largo plazo en Bogotá. Estas ventajas incluyen información fácil de interpretar y comunicar. Además, teniendo en cuenta que las ciudades de la región suelen tener acceso a los principales insumos utilizados en este estudio, como los datos de demanda de viajes y los modelos de transporte tradicionales, es posible producir análisis de accesibilidad monetizables sin aumentar las necesidades de datos. El uso de herramientas que ya son utilizadas en la práctica de la planificación del transporte, refuerza los hallazgos que sugieren la necesidad de adaptar y reinterpretar los enfoques dominantes para producir análisis sociales más detallados (Ziemke et al., 2018). El uso de modelos de comportamiento también contribuye a hablar un lenguaje común con los asesores técnicos y los profesionales de diferentes sectores, que a menudo confían en estas herramientas para soportar las decisiones.

Métricas como el logsum presentado en este estudio, se sitúan entre las muy conocidas medidas de accesibilidad al estilo Hansen (es decir, medidas de gravedad) y los modelos de comportamiento más complejos que mejoran el análisis y estimación de la demanda de transporte. Al equilibrar el panorama mediante el uso de herramientas ya aceptadas, es posible no sólo facilitar la transición de las métricas de accesibilidad a enfoques estándar de elaboración y evaluación de políticas, sino también facilitar su apropiación y despliegue como parte de modelos estándar utilizados a menudo en las fases previas de los proyectos.

Desde una perspectiva de la operacionalización de la accesibilidad en la planificación y evaluación de las inversiones públicas, los resultados muestran que añadir evaluaciones de accesibilidad en las fases de planificación y viabilidad de futuras intervenciones en el transporte puede arrojar resultados contundentes sobre viabilidad del proyecto. Este enfoque puede ayudar a desentrañar algunos de los resultados agregados producidos por las prácticas habituales de evaluación económica, que tienden a agregar costos y beneficios sin tener en cuenta el impacto distributivo. El enfoque propuesto en este artículo,

y en particular los principios de equidad, proporciona importantes lecciones sobre la pertinencia de los análisis desagregados. Además, un enfoque de este tipo puede ayudar a identificar las zonas o grupos de población que deberían ser priorizados para la inversión pública en transporte. También puede abordar posibles pérdidas no deseadas debido a características, preferencias o comportamientos individuales específicos. Como muestran otros estudios de la revisión de literatura, esto se aplica tanto a las infraestructuras como a otras inversiones. Esta versatilidad sugiere que las métricas de accesibilidad pueden ayudar a informar sobre los cambios estructurales en la red de transporte y los ajustes menores que buscan mejorar la eficiencia, a la vez que proporcionan información sobre sus efectos en las desigualdades sociales y espaciales.

Teniendo en cuenta que la accesibilidad puede manifestarse a diferentes escalas (es decir, macro, meso y micro), las medidas basadas en la utilidad pueden informar las decisiones a todos los niveles (Jones y Lucas, 2012). Por un lado, se ha demostrado que las métricas de accesibilidad basadas en la utilidad ayudan a los análisis estratégicos, con aplicaciones a redes de transporte público multimodal como las utilizadas en este estudio y en investigaciones en diferentes contextos (Nassir et al., 2016). Por otro lado, también es posible capturar aspectos relacionados con el acceso a la infraestructura (meso escala), lo que es coherente con aplicaciones anteriores (Hasnine et al., 2019). Por último, a nivel micro, es posible utilizar métricas basadas en la utilidad para el desglose de las preferencias y experiencias de diferentes segmentos sociales, que se alinean adecuadamente con las preocupaciones actuales de la agenda política en la región con respecto a las desigualdades de género y otras desventajas sociales y espaciales, buscando cerrar las brechas en el transporte urbano. Los análisis de este estudio ilustran la viabilidad de hacerlo, evaluando la accesibilidad basada en la utilidad por género, nivel socioeconómico y ocupación, encajando con los debates actuales en América Latina.

El enfoque orientado a la accesibilidad propuesto en este artículo, podría desempeñar un papel fundamental en la configuración de las ciudades de la región. Esto presenta una oportunidad única para cambiar la investigación y la práctica en un contexto en el que ya existe una sólida tradición de su uso desde principios de la década de 2010 en la evaluación de las desigualdades del sistema urbano de transporte y usos del suelo.



## **7. CONCLUSIONES**

La métrica de la accesibilidad basada en la utilidad usada en este estudio, captura los beneficios derivados de la distribución espacial de las oportunidades a través del tiempo y de las mejoras en las infraestructuras de transporte, utilizando modelos de elección discreta. Este trabajo no pretende exponer innovaciones metodológicas, sino proponer una reflexión basada en datos empíricos sobre el potencial de las estimaciones de accesibilidad basadas en la utilidad. En este sentido, las estimaciones de las medidas de accesibilidad y bienestar dependen de las preferencias individuales que determinan las funciones de utilidad, permitiendo controlar las utilidades percibidas y las funciones de demanda de diferentes grupos socioeconómicos. Aunque en una situación de elección de modo de transporte, el costo y el tiempo de viaje son dos atributos determinantes, ciertamente no son los únicos, ni tienen el mismo significado e influencia para todos los usuarios. Así pues, el marco de modelación debería incorporar el mayor número posible de determinantes de la demanda para estimar resultados más coherentes en términos de cambios en el bienestar.

La utilidad marginal del tiempo de viaje tiende a disminuir con el nivel de ingreso. Es decir, los individuos de menos ingresos están dispuestos a aceptar tiempos de viaje más largos para ahorrar dinero. En esta línea, la disposición a pagar aumenta con el ingreso. Esto genera situaciones de inequidad, pues las limitaciones en la capacidad de pago de las personas con rentas más bajas obligan a hacer compensaciones entre la ubicación del hogar y los costos y tiempos de viaje. En las zonas urbanas, estas asimetrías dan lugar a que los segmentos de población con rentas más bajas que residen en zonas desfavorecidas, normalmente alejadas de las principales oportunidades y que experimentan tiempos de desplazamiento más largos y una menor accesibilidad a empleo y servicios, se vean inmersos en un ciclo auto reforzado de desconexión y aceptación forzosa de costos de viaje cada vez mayores, que se reflejan en bajos valores del tiempo.

El enfoque aquí presentado, permite la evaluación de un rango más amplio de variables, ya que la flexibilidad de los marcos de modelación de elección discreta permite la especificidad de cualquier variable explicativa. Sin embargo, la naturaleza subjetiva de muchos experimentos de elección discreta, especialmente cuando se basan en datos de PD o cuando se evalúan nuevos contextos de mercado, podría generar algunos sesgos, los

cuales podrían superarse complementando dichos datos con PR mediante técnicas de modelación combinada (Louviere et al., 2000). Además, la coherencia de este planteamiento con las teorías microeconómicas del comportamiento, permite evaluar un rango más amplio de implicaciones para el bienestar. Las ganancias de accesibilidad convertidas en dinero pueden ser útiles en la práctica la evaluación de proyectos y, por lo tanto, incorporar la accesibilidad en la planificación del transporte y la evaluación económica, teniendo en cuenta las cuestiones de equidad. Esto puede llevar a priorizar el enfoque de la accesibilidad sobre el enfoque tradicional de movilidad. Esto resulta de interés para el diseño de políticas y la toma de decisiones, ya que los métodos propuestos podrían contribuir a evaluar las implicaciones sociales del transporte, como los vínculos con el capital social, el bienestar y la calidad de vida.

El enfoque propuesto tiene el potencial de informar análisis distributivos más profundos basados en marcos más complejos, como la exclusión social relacionada con el transporte, que solo se han explorado cualitativamente en el contexto local (Oviedo Hernandez y Titheridge, 2016). Los modelos de elección discreta permiten considerar variables asociadas con la exclusión social y la restricción de la movilidad por factores distintos del tiempo y el costo. Estos podrían incluir temas de seguridad personal y vial, la vulnerabilidad al acoso y otras formas de violencia, la discriminación, la falta de tiempo, las responsabilidades de cuidado y otros factores que han sido identificados en la literatura como determinantes significativos del acceso, pero que hasta ahora no han sido incorporados en las evaluaciones tradicionales. Aunque este estudio comparte estas limitaciones, también abre una vía para futuras investigaciones que exploren estas variables en modelos de elección discreta que puedan traducirse posteriormente en evaluaciones de accesibilidad de las intervenciones de transporte, así como evaluar los impactos sobre las elecciones mixtas de modo y destino.

## **REFERENCIAS**

- Arbex, R., Cunha, C.B., 2020. Estimating the influence of crowding and travel time variability on accessibility to jobs in a large public transport network using smart card big data. *J. Transp. Geogr.* 85, 102671. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102671>
- Arellana, J., Oviedo, D., Guzman, L.A., Alvarez, V., 2021. Urban transport planning and

- access inequalities: A tale of two Colombian cities. *Res. Transp. Bus. Manag.* 40, 100554. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100554>
- Banister, D., Berechman, Y., 2001. Transport investment and the promotion of economic growth. *J. Transp. Geogr.* 9, 209-218. [https://doi.org/10.1016/S0966-6923\(01\)00013-8](https://doi.org/10.1016/S0966-6923(01)00013-8)
- Batley, R., 2008. On Ordinal Utility, Cardinal Utility and Random Utility. *Theory Decis.* 64, 37-63. <https://doi.org/10.1007/s11238-007-9046-2>
- Ben-Akiva, M., Lerman, S.R., 1985. *Discrete Choice Analysis Theory and Application to Travel Demand*. MIT Press.
- Bhat, C.R., Handy, S., Kockelman, K., Mahmassani, H.S., Chen, Q., Weston, L., 2000. Development of an Urban Accessibility Index: Literature Review. Report No. TX-01/7-4938-1.
- Bocarejo, J.P., Oviedo, D.R., 2012. Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments. *J. Transp. Geogr.* 24, 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2011.12.004>
- Cantillo-García, V., Guzman, L.A., Arellana, J., 2019. Socioeconomic strata as proxy variable for household income in transportation research. Evaluation for Bogotá, Medellín, Cali and Barranquilla. *DYNA* 86, 258-267. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.81821>
- Cherchi, E., Polak, J.W., 2005. Assessing User Benefits with Discrete Choice Models: Implications of Specification Errors Under Random Taste Heterogeneity. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 1926, 61-69. <https://doi.org/10.1177/0361198105192600108>
- Chorus, C.G., 2012. Logsums for utility-maximizers and regret-minimizers, and their relation with desirability and satisfaction. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 46, 1003-1012. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.04.008>
- de Jong, G., Daly, A., Pieters, M., van der Hoorn, T., 2007. The logsum as an evaluation measure: Review of the literature and new results. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 41, 874-889. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2006.10.002>

- Dixit, M., Sivakumar, A., 2020. Capturing the impact of individual characteristics on transport accessibility and equity analysis. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 87, 102473. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102473>
- Geurs, K.T., van Wee, B., 2004. Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *J. Transp. Geogr.* 12, 127-140. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2003.10.005>
- Gulhan, G., Ceylan, Huseyin, Özuysal, M., Ceylan, Halim, 2013. Impact of utility-based accessibility measures on urban public transportation planning: A case study of Denizli, Turkey. *Cities* 32, 102-112. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.04.001>
- Guzman, L.A., 2019. A strategic and dynamic land-use transport interaction model for Bogotá and its region. *Transp. B Transp. Dyn.* 7, 707-725. <https://doi.org/10.1080/21680566.2018.1477636>
- Guzman, L.A., Arellana, J., Cantillo-García, V., Ortúzar, J. de D., 2021. Revisiting the Benefits of Combining Data of a Different Nature: Strategic Forecasting of New Mode Alternatives. *J. Adv. Transp.* 2021, 1-15. <https://doi.org/10.1155/2021/6672961>
- Guzman, L.A., Bocarejo, J.P., 2017. Urban form and spatial urban equity in Bogota, Colombia. *Transp. Res. Procedia* 25, 4491-4506. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.345>
- Guzman, L.A., Cantillo-Garcia, V.A., Arellana, J., Sarmiento, O.L., 2023. User expectations and perceptions towards new public transport infrastructure: evaluating a cable car in Bogotá. *Transportation (Amst)*. 50, 751-771. <https://doi.org/10.1007/s11116-021-10260-x>
- Guzman, L.A., Oviedo, D., 2018. Accessibility, affordability and equity: Assessing 'pro-poor' public transport subsidies in Bogotá. *Transp. Policy* 68, 37-51. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.04.012>
- Guzman, L.A., Oviedo, D., Bocarejo, J.P., 2017a. City profile: The Bogotá Metropolitan Area that never was. *Cities* 60, 202-215. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.09.004>
- Guzman, L.A., Oviedo, D., Cardona, R., 2018. Accessibility Changes: Analysis of the Integrated Public Transport System of Bogotá. *Sustainability* 10, 3958.

<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su10113958>

Guzman, L.A., Oviedo, D., Rivera, C., 2017b. Assessing equity in transport accessibility to work and study: The Bogotá region. *J. Transp. Geogr.* 58, 236-246. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.016>

Handy, S., 2020. Is accessibility an idea whose time has finally come? *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 83. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102319>

Hasnine, M.S., Graovac, A., Camargo, F., Habib, K.N., 2019. A random utility maximization (RUM) based measure of accessibility to transit: Accurate capturing of the first-mile issue in urban transit. *J. Transp. Geogr.* 74, 313-320. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.12.007>

Hernandez, D., 2018. Uneven mobilities, uneven opportunities: Social distribution of public transport accessibility to jobs and education in Montevideo. *J. Transp. Geogr.* 67, 119-125. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.08.017>

Herszenhut, D., Pereira, R.H.M., Portugal, L. da S., Oliveira, M.H. de S., 2022. The impact of transit monetary costs on transport inequality. *J. Transp. Geogr.* 99, 103309. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103309>

Jones, P., Lucas, K., 2012. The social consequences of transport decision-making: clarifying concepts, synthesising knowledge and assessing implications. *J. Transp. Geogr.* 21, 4-16. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2012.01.012>

Louviere, J.J., Hensher, D.A., Swait, J.D., 2000. Combining sources of preference data, en: *Stated Choice Methods*. Cambridge University Press, pp. 227-251. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511753831.008>

Lu, R., Chorus, C.G., van Wee, B., 2014. The effects of different forms of ICT on accessibility – a behavioural model and numerical examples. *Transp. A Transp. Sci.* 10, 233-254. <https://doi.org/10.1080/18128602.2012.742171>

Ma, S., Kockelman, K.M., Fagnant, D.J., 2015. Welfare Analysis using Logsum Differences versus Rule of Half: Series of Case Studies. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 2530, 73-83. <https://doi.org/10.3141/2530-09>

- Martínez, C.F., Hodgson, F., Mullen, C., Timms, P., 2018. Creating inequality in accessibility: The relationships between public transport and social housing policy in deprived areas of Santiago de Chile. *J. Transp. Geogr.* 67, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2017.09.006>
- McFadden, D., 2001. Economic Choices. *Am. Econ. Rev.* 91, 351-378. <https://doi.org/10.1257/aer.91.3.351>
- Nassir, N., Hickman, M., Malekzadeh, A., Irannezhad, E., 2016. A utility-based travel impedance measure for public transit network accessibility. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 88, 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.03.007>
- Niemeier, D.A., 1997. Accessibility: an evaluation using consumer welfare. *Transportation (Amst)*. 24, 377–396. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1004914803019>
- Ortúzar, J. de D., Willumsen, L.G., 2011. *Modelling Transport*, 4th Editio. ed. Wiley, Chichester.
- Oviedo, D., Nieto-Combariza, M., 2021. Transport Planning in the Global South, en: *International Encyclopedia of Transportation*. Elsevier, pp. 118-124. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102671-7.10624-4>
- Oviedo Hernandez, D., Titheridge, H., 2016. Mobilities of the periphery: Informality, access and social exclusion in the urban fringe in Colombia. *J. Transp. Geogr.* 55, 152-164. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.12.004>
- Peña, J., Guzman, L.A., Arellana, J., 2022. Which dots to connect? Employment centers and commuting inequalities in Bogotá. *J. Transp. Land Use* 15, 17-34. <https://doi.org/10.5198/jtlu.2022.2100>
- Pereira, R.H.M., 2019. Future accessibility impacts of transport policy scenarios: Equity and sensitivity to travel time thresholds for Bus Rapid Transit expansion in Rio de Janeiro. *J. Transp. Geogr.* 74, 321-332. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2018.12.005>
- Pereira, R.H.M., Braga, C.K.V., Servo, L.M., Serra, B., Amaral, P., Gouveia, N., Paez, A., 2021. Geographic access to COVID-19 healthcare in Brazil using a balanced float catchment area approach. *Soc. Sci. Med.* 273, 113773. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2021.113773>

- Pot, F.J., van Wee, B., Tillema, T., 2021. Perceived accessibility: What it is and why it differs from calculated accessibility measures based on spatial data. *J. Transp. Geogr.* 94, 103090. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103090>
- Slovic, A.D., Tomasiello, D.B., Giannotti, M., Andrade, M. de F., Nardocci, A.C., 2019. The long road to achieving equity: Job accessibility restrictions and overlapping inequalities in the city of São Paulo. *J. Transp. Geogr.* 78, 181-193. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.06.003>
- Tiznado-Aitken, I., Vecchio, G., Guzman, L.A., Arellana, J., Humberto, M., Vasconcellos, E., Muñoz, J.C., 2023. Unequal periurban mobility: Travel patterns, modal choices and urban core dependence in Latin America. *Habitat Int.* 133, 102752. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2023.102752>
- Train, K.E., 2009. *Discrete Choice Methods with Simulation*, *Discrete Choice Methods with Simulation*, Second Edition. Cambridge University Press, Cambridge. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511805271>
- Tressider, J.O., Meyers, D.A., Burrell, J.E., Powell, T.J., 1968. The London transportation study: methods and techniques. *Proc. Inst. Civ. Eng.* 39-6, 433-464.
- van Wee, B., 2016. Accessible accessibility research challenges. *J. Transp. Geogr.* 51, 9-16. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018>
- Vecchio, G., Tiznado-Aitken, I., Hurtubia, R., 2020. Transport and equity in Latin America: a critical review of socially oriented accessibility assessments. *Transp. Rev.* 40, 354-381. <https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1711828>
- Williams, H.C.W.L., 1977. On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. *Environ. Plan. A* 9, 285-344.
- Zhang, D., 2023. Understanding mobility inequality through the lens of economic welfare: The difference in willingness-to-pay and actual fare matters. *Cities* 132, 104121. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104121>
- Zhao, Y., Kockelman, K., Karlström, A., 2012. Welfare calculations in discrete choice settings: An exploratory analysis of error term correlation with finite populations. *Transp. Policy* 19, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.09.002>



---

Ziemke, D., Joubert, J.W., Nagel, K., 2018. Accessibility in a Post-Apartheid City: Comparison of Two Approaches for Accessibility Computations. *Networks Spat. Econ.* 18, 241-271. <https://doi.org/10.1007/s11067-017-9360-3>