

ANÁLISIS DE EQUIDAD EN LA OFERTA DE TRANSPORTE PÚBLICO MEDIANTE UN MODELO LUTI (LAND-USE AND TRANSPORT INTERACTION). APLICACIÓN AL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA EN COLOMBIA.

Jhair Andrés Manrique Bautista

GIST, Departamento de Transportes, Universidad de Cantabria, España.

Rubén Cordera Piñera

GIST, Departamento de Transportes, Universidad de Cantabria, España.

Borja Alonso Oreña

GIST, Departamento de Transportes, Universidad de Cantabria, España.

Emilio Germán Moreno Gonzalez

GRINDIC, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia

RESUMEN

La planificación y gestión del transporte debe fundamentarse en un conjunto de técnicas que permitan evaluar, de manera integral y dinámica, su funcionamiento en interacción con los usos del suelo. Para concretar esta idea, se plantea el desarrollo y estimación de un modelo LUTI (Land-Use and Transport Interaction), que incorpora cuatro sub-modelos: Transporte (MT), Localización Residencial (MLR), Localización de Actividades Económicas (MLAE) y Modelo de Indicadores de Accesibilidad (MIA). Además, los resultados de este modelo se han evaluado mediante la estimación de distintos indicadores: de equidad horizontal, mediante el uso del Índice de Servicio de Transporte Público (ISTP), de equidad vertical, mediante el Índice de Necesidad Social del Transporte Público (INSTP) y de igualdad mediante el coeficiente de Gini. Este modelo se ha aplicado al análisis de equidad espacial ofertada por el Sistema Integrado de Transporte Metrolinea (SITM) en el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) en Colombia. Los resultados obtenidos ofrecen un cálculo de la equidad en la provisión del servicio de transporte público, considerando tanto la oferta como la necesidad social, entre las distintas zonas del AMB. Esto ha permitido detectar aquellas áreas con mayor necesidad de transporte público y aquellas que, en cambio, experimentan sobre-provisión del servicio.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, la migración de población desde zonas rurales a las ciudades ha ocasionado un rápido crecimiento de éstas en términos de población, densidad y empleo. Esto ha impulsado un fuerte aumento de la demanda de suelo y, consecuente, de movilidad, una dinámica que ha obligado a implementar de manera urgente una planificación urbana y del

transporte más sostenible, es decir, que fomente un crecimiento más equilibrado. Entre las ciudades que experimentan este crecimiento se encuentra el Área Metropolitana de Bucaramanga (AMB) con un desarrollo urbanístico típicamente determinado por los sectores residencial y comercial, mientras que la planificación del crecimiento en infraestructura y servicios de transporte ha sido mucho más lenta. Este proceso ha ido por lo tanto en dirección opuesta a la regla fundamental de sostenibilidad urbana, la cual propone un equilibrio entre los componentes de la movilidad y de uso del suelo (Cordera et al., 2018). La entidad de planificación del AMB ha aplicado distintas políticas para intentar articular transporte y territorio, y atenuar el impacto de la congestión derivada de un uso excesivo del vehículo privado. Dentro de las principales medidas, se implementó un sistema de transporte público tipo Bus Rapid Transit (BRT), denominado Sistema Integrado de Transporte Metrolinea (SITM), para incentivar el modo público frente al uso de transporte individual. Sin embargo, los resultados han sido limitados, gran proporción de usuarios prefieren un elevado tiempo de viaje con mayor confort antes que usar un transporte público, que parece ser cada vez más ineficiente (Ardila, 2019; Pineda, 2017). Por tanto, la falta de planificación y ausencia de técnicas que permitan una evaluación objetiva, han generado hasta ahora soluciones con una efectividad limitada.

En esta ponencia se propone una metodología para la modelización y la evaluación de la equidad espacial del transporte público, considerando la oferta y demanda (Currie, 2010), que ayude a mejorar la planificación del mismo. En el análisis de la oferta se usa el Índice de Servicio de Transporte Público (ISTP), y en la demanda, el Índice de Necesidad Social del Transporte Público (INSTP), con el objetivo de obtener una visión clara sobre la equidad en la provisión del servicio. Se entiende además por equidad horizontal, el equilibrio o desequilibrio entre la densidad de población y la oferta de transporte público, y por equidad vertical el nivel de equilibrio o desequilibrio entre la necesidad social y la oferta que provee cada zona del área de estudio. Finalmente, se ha establecido el nivel de disparidad entre oferta y demanda, resaltando las zonas con mayor necesidad de transporte y aquellas donde hay sobre-provisión del servicio. Para una visión global de la equidad y la igualdad en el servicio que provee el SITM, se utiliza el coeficiente de Gini y la curva de Lorenz (Delbosc & Currie, 2011). Este análisis espacial se ha basado en un modelo de interacción entre el transporte y los usos del suelo (modelo LUTI) que, adaptado al AMB, se redefine como AMB-LUTI. Este modelo se ha apoyado en los resultados obtenidos por Cordera et al. (2013), Barrett et al. (2002), John (2005), Salvini & Miller (2005), Strauch et al. (2005), Waddell (2002), Salas et al. (2017) y Guzmán et al. (2017), en este último caso con resultados de carácter más local. En concreto, la metodología interrelaciona los cuatro sub-modelos mediante programación Python, para la representación dinámica y versátil del comportamiento de la movilidad en un día laborable.

2. METODOLOGÍA

Para poder realizar el cálculo de los índices de equidad, se ha partido del desarrollo por etapas de un modelo LUTI, el cual proporcionará los datos de entrada. Este modelo presenta cuatro sub-modelos interrelacionados, procediendo posteriormente a integrar su funcionalidad mediante el lenguaje de programación Python.

2.1 Estructura del Modelo AMB-LUTI

Con el objeto de analizar el SITM, se ha considerado necesario estimar un modelo LUTI (Torrens, 2000) que simule el funcionamiento del sistema urbano. Este modelo debe ser capaz de representar la organización espacial del transporte y de las actividades humanas en el área metropolitana (Lowry, 1964), es decir, reproducir y estimar la movilidad y la localización residencial de la población y de sus actividades económicas. Los modelos LUTI pueden clasificarse en tres grandes grupos según Cordera et al. (2018): de *primera generación* basados en la teoría de la interacción espacial (Wilson, 1970; Andrews, 1953), en técnicas de programación matemática (Herbet & Stevens, 2006; Brotchie et al., 1980) o en matrices de input/output (Leontief, 1966; Echenique, 2011); los de *segunda generación* basados en la teoría de utilidad aleatoria (McFadden, 1974) para la simulación de los usos del suelo (Martínez, 1997; Anas, 1983); los de *tercera generación* basados en modelos desagregados llamados de micro-simulación (Iacono et al., 2007; Castiglione et al., 2015).

El modelo propuesto AMB-LUTI se fundamenta en técnicas tanto de primera como de segunda generación, bajo la premisa de establecer el equilibrio entre los cuatro sub-modelos que lo componen. Es decir, si ocurre un cambio en el uso del suelo, este repercute en el sistema de transporte, generando un nuevo equilibrio y nueva representación del sistema urbano. Este aspecto hace que se interactúe con escenarios hipotéticos mostrando sus posibles efectos. La estructura del modelo AMB-LUTI se puede ver en la Figura 1.

Los cuatro sub-modelos del AMB-LUTI son: modelo de transportes (MT) que funciona con la información proveniente del modelo de localización residencial (MLR) y de actividades económicas (MLAE), generando el equilibrio entre la oferta y demanda de transportes; el MLR que funciona con la información proporcionada por el MT y por el MLAE simulando un patrón de localización residencial de trabajadores por clase socioeconómica; el MLAE que funciona con la información dada por el modelo de accesibilidad (MIA) y MLR, simulando la distribución de las actividades económicas por sector económico; y el MIA que utiliza la información del MT y MLR, y proyecta el nivel de oportunidades que tiene cada zona para acceder al empleo. Además, hay una serie de supuestos del modelo que ayudan a simplificar la simulación, limitando o excluyendo aspectos secundarios difíciles de modelizar (Cordera et al., 2013): la zona de estudio se considera cerrada, es decir, la demanda laboral es satisfecha por la oferta de trabajadores internos al AMB, evitando simular la inmigración y emigración de trabajadores desde zonas colindantes; la ubicación de actividades económicas, como las industrias exportadoras, se considera fija, ya que no

depende de la distribución poblacional, ni de la demanda interna de comercio y cuya ubicación está establecida por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT); el modelo AMB-LUTI considera la restricción en cuanto a población residente y actividades económicas presentes en cada zona. Si esta capacidad es superada, el modelo reubica estas familias/empresas en su siguiente localización preferida.

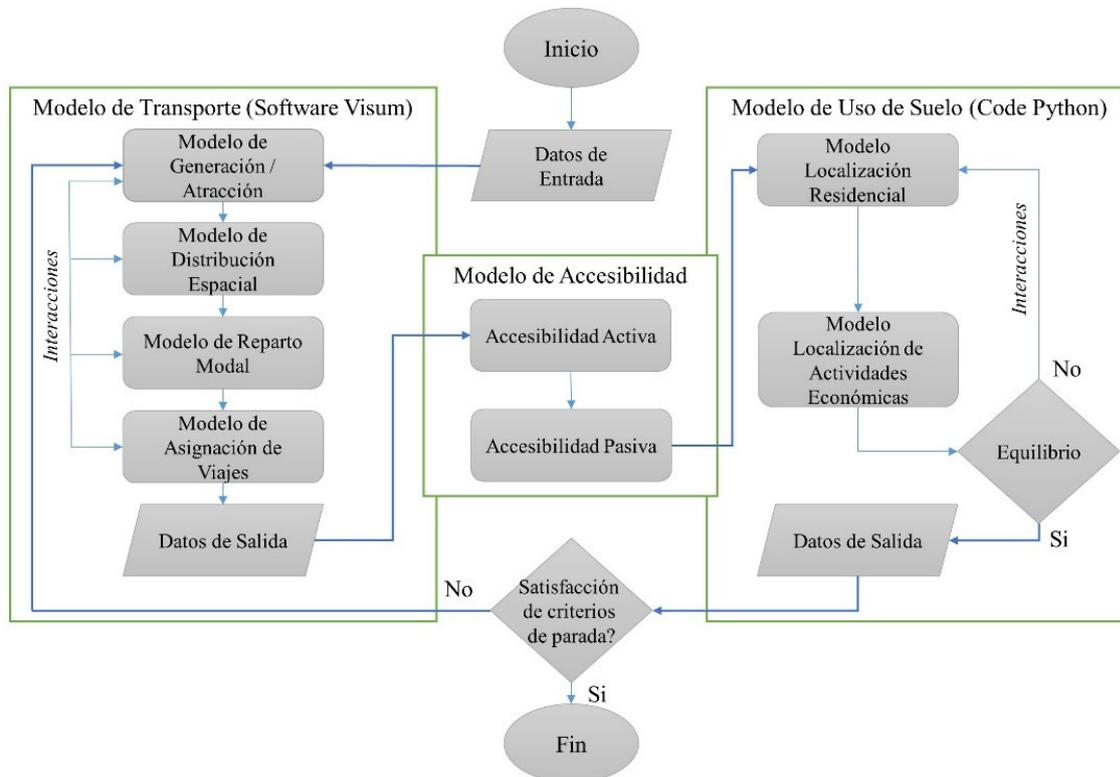


Figura 1: Estructura del modelo AMB-LUTI propuesto

2.1.1 Modelo de Transporte (MT)

El MT utilizado se ha basado en desarrollos anteriores. Tiene carácter estratégico con estructura propia del modelo clásico de 4-etapas (Ortuzar & Willumsen, 2011); *generación-atracción de viajes, distribución de viajes, elección modal y asignación*. La primera etapa está formulada bajo el concepto de ciclo de viaje, es decir, una cadena de viajes con origen en el hogar hacia un destino y respectivo retorno; considerado viaje basado en el hogar (Jovicic & Hansen, 2003). Cada hogar tiene un vector de datos de entrada con características socioeconómicas y elecciones de movilidad realizadas por las personas del hogar. Los viajes son modelizados mediante regresión lineal y posteriormente expandidos por la cantidad de hogares de cada zona. La segunda etapa constituye un modelo de maximización de entropía doblemente acotado basado en la analogía del modelo gravitacional (véase la Ecuación 1).

$$V_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(C_{ij}) \quad (1)$$

donde:

- V_{ij} : viajes entre zonas i y j
- A_i : factor de balanceo en zona i ; O_i : viajes originados desde zona i
- B_j : factor de balanceo en zona j
- D_j : viajes atraídos desde zona j
- $f(C_{ij})$: función de coste entre zonas i y j

La función de coste $f(C_{ij})$ puede presentar distintas formas, entre ellas la forma combinada (Williams, 1976) de la Ecuación 2. Los costes entre zonas son calculados a partir del coste compuesto (Williams, 1977) mediante la Ecuación 3, el cual es a su vez generado a partir de los costes generalizados por modo de viaje de las Ecuaciones 4 y 5.

$$f(C_{ij}) = a * K_{ij}^b * \exp(-\beta * K_{ij}) \quad (2)$$

$$K_{ij} = 1 / -\lambda \cdot \ln \sum_n \exp(-\lambda(C_{ij}^n + \delta_{ij}^n)) \quad (3)$$

$$C_{ij}^{Bus} = Coste1 + \theta_{tvp} T_{viaje \text{ percibido}} \quad (4)$$

$$C_{ij}^{Car} = Coste2 + \theta_{tv} T_{viaje} \quad (5)$$

donde:

- $f(C_{ij})$: función de coste de tipo combinada;
- K_{ij} : coste compuesto del viaje entre zonas i y j
- a , b y β : parámetros de calibración
- C_{nij} : coste generalizado entre i y j en el modo n
- λ y δ : parámetros de calibración
- C_{Bus} : coste generalizado en transporte público
- $Coste1$: valor del ticket transformado a minutos
- θ_{tvp} : parámetro tiempo de viaje
- $T_{viaje \text{ percibido}}$: tiempo de viaje percibido por usuario en vehículo, por trasbordo, entrada, salida y espera.
- C_{Car} : coste generalizado en transporte privado
- $Coste2$: valor proporcional a la distancia recorrida (min)
- θ_{tv} : parámetro tiempo de viaje en transporte privado
- T_{viaje} : tiempo de viaje dentro del vehículo.

La tercera etapa está basada en la información de cada zona, y es modelo de tipo Logit Multinomial (MNL) que determina la probabilidad de elegir cada modo de transporte. El MNL se genera aceptando que los residuos aleatorios se distribuyen Gumbel independiente e idénticamente distribuidos entre alternativas (IID) (Domencich & McFadden, 1975). Esto permite deducir el modelo dado en la Ecuación 6.

$$P_n = (\exp^{-\lambda(C_n + \delta_n)}) / (\sum_m \exp^{-\lambda(C_m + \delta_m)}) \quad (6)$$

donde:

- P_n : probabilidad de elegir un modo de desplazamiento n
- λ : parámetro de escala
- C_n : coste generalizado del modo
- δ : penalidad modal de cada modo.

La cuarta etapa consiste en simular los arcos de red más usados para los desplazamientos generados entre cada par origen-destino, cargándose posteriormente los flujos vehiculares estableciendo las condiciones de tránsito y volumen de pasajeros en las rutas del SITM por zona. Esta asignación es simulada usando el software de transporte Visum.

2.1.2 Modelo de Localización Residencial (MLR)

El MLR se basa en la probabilidad de que un trabajador elija su lugar de residencia dado que trabaja en la zona d . La elección se basa en un modelo de elección de zona donde el trabajador maximiza su utilidad de localización. El modelo es probabilístico, permitiendo la evaluación de cada zona de acuerdo a sus atributos socioeconómicos, ambientales e infraestructurales (Hsu & Guo, 2006).

$$P_{res-job}^i(o|d) = (\exp[U^i(o|d)]) / (\sum_n^i \exp[U^i(o|d)]) \quad (8)$$

donde:

- P_i : probabilidad de residir en la zona o condicionado a trabajar en la zona d para un usuario de tipo i
- U_i : utilidad sistemática de cada zona o .

La utilidad asumida en cada zona puede descomponerse en dos partes: una sistemática o representativa, medida directamente por el modelador y otra aleatoria cuya distribución se supone Gumbel IID. La utilidad queda definida como:

$$U_i(o|d) = V_i(o|d) + \varepsilon_i(o|d) \quad (9)$$

donde:

- $V_i(0|d)$: atributos cuantitativos de la zona y/o trabajador
- $\epsilon_i(o|d)$: residuo o utilidad aleatoria.

Dado que la primera hipótesis del modelo supone que el área de estudio es cerrada, es posible calcular el número de trabajadores de estrato i que residen en la zona o como:

$$W^i(o) = \sum_d P_{res-job}^i(o|d) * Job^i(d) \quad (10)$$

donde $Job^i(d)$: Número de empleos disponibles en la zona d de estrato socioeconómico i .

Además, partiendo de la cantidad de trabajadores de estrato i residentes en la zona o , es posible determinar la población total de dicha zona, aplicando un coeficiente que representa la relación entre población y personas con trabajo.

$$Pop(o) = K(o) * \sum_i \sum_d W^i(o) \quad (11)$$

donde $K(o)$: ratio entre población y trabajadores en la zona o .

En el MLR, la relación establecida entre la población residente en una zona y los trabajadores presentes en ella, está respaldada por la teoría urbana clásica (Alonso, 1964; Putman, 1979; Simmonds, 1999; Marinez & Donoso, 2001).

2.1.3 Modelo de Localización de Actividades Económicas (MLAE)

La estructura del MLAE es similar al MLR. Partiendo de la teoría de utilidad aleatoria, simula las decisiones de localización de las actividades económicas por medio de elecciones discretas donde se supone que las empresas asignan a cada zona una utilidad y eligen aquella que la maximiza. La probabilidad de localización está dada por la Ecuación 8, usando la Ecuación 9 para el cálculo de la utilidad sistemática. El modelo permite determinar la distribución de empleos por zona y por sectores de actividad según la Ecuación 12.

$$Job_a(d) = P_a(d) * Job_a \quad (12)$$

donde:

- $Job_a(d)$: número de empleos ubicados en la zona d pertenecientes al sector económico a ;
- $P_a(d)$: probabilidad de localización de empleos de tipo a en la zona d
- Job_a : número de empleos totales pertenecientes al sector económico a en el área estudiada.

2.1.4 Modelo de Indicadores de Accesibilidad (MIA)

El MIA es el enlace fundamental en la modelización que relaciona el sistema de transporte y el sistema de usos del suelo. La accesibilidad es la capacidad que tiene un individuo, desde un lugar determinado, de participar en una actividad específica localizada en otro lugar (Hansen, 1959), o bien, la facilidad con la que se puede realizar una determinada actividad desde cualquier ubicación a través del sistema de transportes (Dalvi & Martin, 1976). El indicador de accesibilidad utilizado en este caso es de tipo gravitatorio basado en el concepto de Location-based accessibility (Geurs & Van Wee, 2004). Además, se han considerado dos indicadores dentro de ese tipo: *accesibilidad activa* (Ecuación 13) u oportunidad potencial para acceder a múltiples actividades desde una zona específica (Cascetta, 2009) y *accesibilidad pasiva* (Ecuación 14), o potencial de oportunidades que tiene una zona de ser alcanzada por la población de diferentes lugares.

$$A(o) = \sum_i [\exp(\alpha_1 * Cost(o, d_i) * Job(d_i)^{\alpha_2})] \quad (13)$$

donde:

- Cost (o, di): coste de viaje entre zona de origen y zona de destino i
- Job(di): número de empleos presentes en la zona de destino i; α_1 : parámetro de calibración
- α_2 : parámetro de calibración.

$$A(d) = \sum_i [\exp(\beta_1 * Cost(o_i, d) * Pop(o_i)^{\beta_2})] \quad (14)$$

donde:

- Cost (oi, d): coste de viaje entre la zona de origen y destino
- Pop(oi): población presente en la zona de origen
- β_1 : parámetro de calibración; β_2 : parámetro de calibración.

2.2 Evaluación de la equidad en la prestación del servicio de transporte público

La metodología para evaluar la equidad presenta cuatro fases: análisis de oferta del servicio de transporte público, análisis de la demanda potencial del servicio público, índices de disparidad entre oferta y demanda y análisis global.

2.2.1 Análisis de la oferta del servicio de transporte público

La metodología de evaluación más eficiente formulada por Currie (2010) y Delbosc & Currie (2011), hace posible determinar la oferta por medio del ISTP (Rodríguez et al., 2006) basado en la infraestructura (Geurs & Van Wee, 2004). El análisis de la oferta del sistema de transporte público cuantifica el aprovisionamiento en infraestructura y planificación de rutas que tienen las diferentes zonas del área de estudio. Las zonas que presentan un índice bajo

mostrarán poca provisión y, si el índice es alto, el nivel de provisión del servicio será elevado.

$$ISTP_n = \sum_{i=1}^n (Buffer_{(i)(n)} / Area_n * NS_i) \quad (15)$$

donde:

- Buffer(i)(n): área de influencia de la parada i en la zona n
- Arean: área total de la zona n
- NSi: nivel de servicio de la parada i (numero de servicios que ofrece cada parada en un día laboral).

2.2.2 Análisis de la demanda potencial del servicio de transporte público

El INSTP clasifica las zonas donde se requiere mayor infraestructura o servicios, dada una mayor demanda potencial y un perfil socioeconómico determinado. Puede ser difícil analizar el papel del transporte en la exclusión social en distintos países, ya que la administración no brinda información suficiente sobre las necesidades de demanda insatisfecha (McCray & Brais, 2007), motivo por el cual se utiliza el método propuesto por Currie (2004; 2010), utilizado en múltiples estudios (Camporeale et al., 2019; Ruiz et al., 2016) y que se basa en un modelo multicriterio ponderado con variables socioeconómicas de la zona, a las que se le asigna un peso en función de su relevancia, según reflejen una necesidad social de transporte público mayor.

$$INSTP_z = \sum_{i=1}^n (Buffer_{(i)(n)} / Area_n * NS_i) \quad (16)$$

$$VN = (Valor\ variable - Valor\ minimo\ de\ la\ variable) / (Valor\ maximo\ de\ la\ variable - Valor\ minimo\ de\ la\ variable) \quad (17)$$

donde:

- Xi: valor normalizado de la variable socioeconómica de la zona i
- Wi: peso asignado a cada variable X
- VN: valor normalizado

2.2.3 Índice de disparidad entre oferta y demanda

El ISTP cuantifica la oferta de transporte público, en términos del número de paradas y frecuencia de rutas, asignando un valor de aprovisionamiento que tiene cada zona. El INSTP cuantifica la necesidad de transporte público que tiene una zona desde la perspectiva de los residentes. La diferencia entre el ISTP y INSTP se denomina Índice de Disparidad entre Oferta y Demanda (IDOD). Este indicador ayuda a detectar las zonas en las que debería ser mejorado el servicio.

$$IDOD_i = INSTP_i - ISTP_1 \quad (18)$$

2.2.4 Análisis global de equidad

A partir de los índices ISTP y INSTP se procede a calcular la equidad horizontal (EH) y vertical (EV) usando las siguientes expresiones (Ruiz et al., 2016):

$$EH_i = DP_i / ISTP_i \quad (19)$$

$$EV_i = INSTP_i / ISTP_i \quad (20)$$

donde:

- EHi: equidad horizontal de la zona i
- EVi: equidad vertical de la zona i
- DPi: densidad poblacional de la zona i.

Las zonas con EH alto corresponden a un mayor equilibrio entre la población de una zona y el servicio en transporte público que dispone. Un valor de EV bajo representa a zonas con elevada necesidad de transporte público y bajo nivel del servicio. Como complemento, se calcula el Coeficiente de Gini (Delbosc & Currie, 2011), obtenido a partir del análisis de proporción de áreas de la Curva de Lorenz (Rodríguez et al., 2016). Este coeficiente refleja la medida de disparidad con valor que oscila entre 0 y 1; donde 0 corresponde a una distribución totalmente igualitaria (igualdad total en la oferta de servicio público) y 1 refleja una disparidad total (una zona tiene toda la oferta y el resto nada). El coeficiente de Gini se calcula mediante la Ecuación 21.

$$G = 1 - \sum_{i=0}^n (\sigma Y_{i-1} - \sigma Y_i) + (\sigma X_{i-1} + \sigma X_i) \quad (21)$$

donde:

- σY : porcentaje acumulado de ISTP
- σX : porcentaje acumulado de EH o EV.

3. CALIBRACIÓN DEL MODELO LUTI PARA EL AMB (AMB-LUTI)

3.1 Área de estudio

El AMB se ubica en Santander-Colombia y está conformada por 4 municipios: Bucaramanga (17 zonas), Floridablanca (8 zonas), Girón (3 zonas) y Piedecuesta (3 zonas), estando el área en conjunto dividida en 31 zonas con una población total de 1.160.244 habitantes (Dane, 2019) (véase la Figura 2). Cada zona tiene una red vial interna e información socioeconómica propia. La población se encuentra distribuida de la siguiente manera: Bucaramanga con 543.574 habitantes, Floridablanca 273.817 habitantes, Girón 181.811 habitantes y

Piedecuesta 161.042 habitantes. El AMB tiene además un total de 58.932 comercios que generan 538.671 empleos (DANE).

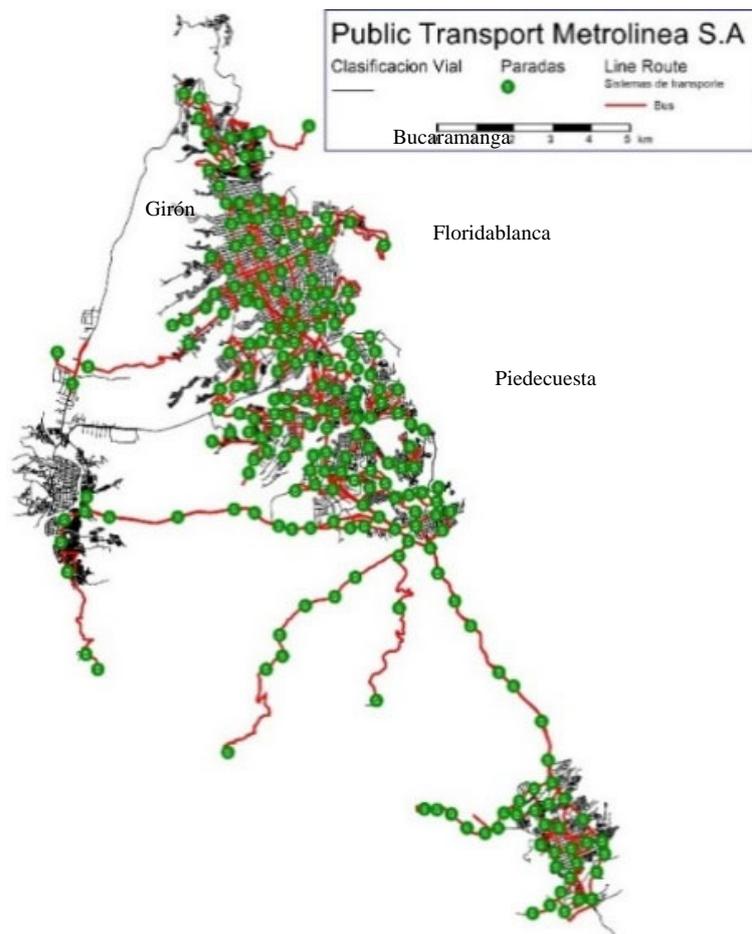


Figura 2: Municipios del AMB y rutas del SITM. Fuente: Metrolínea (2019)

Los datos socioeconómicos, de capacidad vial, tipo de vía y velocidad, son tomados del POT de cada municipio. El SITM es un sistema de autobús tipo BRT que permite viajar por carril segregado en ciertos tramos del viario (Wright & Hook, 2007). Opera de distintas formas, ya que ofrece la posibilidad de construir cada subsistema a la medida aprovechando la infraestructura existente y los vehículos disponibles. Actualmente existen 4 líneas troncales, 10 pre-troncales, 20 alimentadoras y 14 complementarias.

3.2 Calibración del modelo de transporte (MT)

A falta de encuestas de movilidad, los modelos de generación y atracción de viajes se estimaron a partir de una base de datos sobre viajes en día laborable (Manrique, 2016), correlacionada con encuestas domiciliarias de movilidad de la ciudad de Bogotá (Alcaldía de Bogotá, 2011) para comprobar su validez. Se formularon los modelos de viajes basados en el hogar (H), que representa el 91,2 % de la movilidad diaria en el área Metropolitana de Bogotá (Guzmán et al., 2015). El modelo de generación se establece con cuatro variables: ingreso *bajo* (1 a 2 salarios mínimos mensual legal vigente smmlv), *bajo-medio* (2 a 4

smmlv), *medio* (4 a 6 smmlv) y *alto* (> 6 smmlv), y la variable *personas por hogar* (P/H). (véase la Tabla 1).

Variable	Modelo de Generación		Modelo de Atracción	
	Coefficiente	p-valor	Coefficiente	p-valor
Constante	-0,548	1,39E-06	1,555	0,03123
Ibm/H	0,383	9,23E-20		
Im/H	1,069	8,96E-30		
Ia/H	1,349	1,03E-29		
P/H	1,324	9,81E-30	0,248	0,168143
E/H			1,998	1,03E-38
R ²	0,996		0,998	
R ² ajustado	0,996		0,998	
F -Test	1869,485		9930,55	

Tabla 1: Estimación de variables y bondad de ajuste en los modelos de generación y atracción de viajes

El modelo de atracción se formula con las variables explicativas *personas por hogar* (P/H) y *empleos por hogar* (E/H). Este último, hace referencia a los empleos en comercios y/o servicios en cada zona. El modelo para distribución de viajes queda establecido en la Ecuación 1 que, a su vez, requiere de la función de coste combinada (Ec. 2), formulada con los parámetros de calibración: a , b y β que se muestran en la tabla 2.

Parámetros de calibración (a , b , β , λ , δ Car, δ Bus)	
a	0,00
b	5,73
β	-0,06
λ	0,007
δ Car	0
δ Bus	208

Tabla 2: Parámetros estimados para la función de coste y para el cálculo del coste compuesto

Estos parámetros representan la distribución de frecuencias de los tiempos de viaje en el AMB. La función de coste del modelo de distribución utiliza el cálculo del coste compuesto (Ec. 3), donde se establece un valor de coste por cada par origen-destino considerando la disponibilidad de transporte privado, de transporte público o de ambos. La Ecuación 3 presenta los parámetros a estimar: λ , δ Car y δ Bus. Los parámetros δ reflejan la penalidad de cada modo, en relación al otro, y son estimados mediante la transformada de Berkson-Theil, con una desutilidad claramente significativa para el transporte público respecto del coche.

En el coste generalizado del transporte privado se utilizó un valor de 426 \$ colombianos por kilómetro recorrido con un valor del tiempo de viaje para este modo de 77,80 \$ por minuto (Marquez, 2013). Para el coste generalizado del sistema de transporte público se utilizó el

coste del viaje de 2.450 \$, valor constante en todos los pares origen-destino, dado que, con el valor de un viaje, el usuario puede realizar los trasbordos necesarios mientras se mantenga en el sistema. El valor del tiempo de viaje para este modo se estimó en 55,64 \$ por minuto.

3.3 Estimación del MLR y MLAE

El MLR se estimó diferenciando entre residentes con ingreso *bajo* (Ib), *bajo-medio* (Ibm), *medio* (Im) y *alto* (Ia). La utilidad percibida queda especificada con las variables: tiempo de viaje por modo de casa al trabajo considerando congestión y expresado en minutos (JT); accesibilidad activa de la zona (ACA); valor metro cuadrado de viviendas según estrato y características socioeconómicas de la zona (VM2); número de viviendas presentes en la zona (NV); y una variable dummy con valor igual a 1 si la zona tiene un prestigio especial (VP). La estimación de los parámetros de la función de utilidad se realizó mediante máxima verosimilitud (véase Tabla 3); al estar la muestra desagregada a un nivel de elección individual, permite la segmentación de la misma en los cuatro grupos sociales, reduciendo el error de agregación y considerando diferentes variables en la función de utilidad de cada estrato económico. Las personas con ingreso medio fueron el estrato base para el cálculo de los demás parámetros.

	Var.	JT	ACA	VM2	NV	VP	ACP	EMP	RES	CEN	Log (θ)	Log (θ)	N
Resid. Ib	β	-	-	-0,0082	1,75E-05	1,2909					-8717	-10929	3183
	p-val	0,01181	-	0	0,001	0							
Resid. Ibm	β	-	-	-0,00171	1,75E-05	1,2909							
	p-val	0,00946	-	0	0,001	0							
Resid. Im	B	-	-	-	1,75E-05	1,2909							
	p-val	-	-	-	0	0							
Resid. Ia	β	0,00421	-	0,00241	1,75E-05	1,2912							
	p-val	0,012	-	0,000	0,001	0							
Sector Comer	β			-0,0001			1,22E-06	3,25E-05	4,68E-06	0,64883	-16644	-18833	5504
	p-val			0			0,446	0	0	0			
Sector Serv.	β			5,97E-05			2,38E-05	2,57E-05	9,67E-06	0,80724	-11140	-12797	3742
	p-val			0,007			0	0	0	0			

Tabla 3: Parámetros estimados para los MLR y MLAE

El MLR resultó coherente con las hipótesis teóricas. La log-verosimilitud de -8717 es mayor al modelo nulo, de igual forma las variables explicativas obtuvieron signos consistentes con lo esperado; el parámetro de la variable JT presenta signo negativo en personas con ingreso bajo y bajo-medio, con un nivel de confianza del 95%, lo que señala que prefieren residir en zonas cercanas al lugar de trabajo. Dentro de esta misma variable, las personas con ingreso alto presentaron signo positivo en el parámetro, esto se debe a que este tipo de residentes se localizan en zonas claramente alejadas del centro de la ciudad y de los lugares de trabajo.

El parámetro VM2 presenta signo negativo en personas con ingreso bajo y bajo-medio, ya que este grupo reside en zonas con valor metro cuadrado de vivienda menor, en contraste, el signo positivo en personas con ingreso alto refleja la preferencia de vivir en zonas más costosas. Las variables NV y VP son significativas con signo positivo lo cual es coherente, las personas prefieren residir en zonas donde se tiene mayor presencia de viviendas y

prestigio. La variable de accesibilidad activa (ACA) no fue significativa, dado que se cuenta con suficientes variables que soportan el modelo de localización (JT), esta variable no se incluye en el modelo final. Para el MLAE las actividades se dividieron en tres tipos: comercial, de servicio e industrial. La actividad industrial se considera como básica en el presente modelo y su localización es fija. La utilidad sistemática del modelo ha quedado especificada como una combinación lineal de los atributos: accesibilidad pasiva (ACP) de la zona en función del tiempo de viaje y de la localización de la población (Ec. 14); empleos presentes en la zona (EMP); residentes presentes en la zona (RES); y una variable dummy que representa si la zona pertenece al centro urbano (CEN). La estimación se realizó por el método de máxima verosimilitud, obteniendo resultados coherentes con las hipótesis teóricas. Se formularon dos modelos distintos, uno para las actividades comerciales y otro para los servicios. Ambos modelos presentaron una log-verosimilitud mayor a la del modelo nulo. En las actividades de tipo comercial, las variables EMP, RES y CEN presentaron parámetros positivos y significativos, a un nivel de confianza del 95 %, excepto para la variable ACP cuyo parámetro fue significativo a un nivel de confianza del 90 %, aunque, dada su importancia teórica y papel como variable de política, se decidió mantener en el modelo. El precio del metro cuadrado de bienes inmobiliarios en la zona tuvo signo negativo, es decir, la mayoría de los propietarios de comercios prefieren localizar su negocio en zonas de menor coste. En el modelo para las actividades económicas de servicios, todos sus parámetros fueron significativos, incluida la accesibilidad pasiva. La variable VM2 presentó un parámetro positivo lo que significa que, para este tipo de negocio, la localización es influenciada por zonas con residentes de alto ingreso, lo que es coherente con lo observado. La variable CEN presento en ambos casos el parámetro con el mayor peso. Esta calibración, aunque no se aplica directamente en el análisis de equidad de la situación actual, permitiría realizar este análisis en distintos escenarios de planificación.

3.4 Calibración del modelo de accesibilidad (MIA)

La estimación de los parámetros de los modelos de accesibilidad activa y pasiva se realizó linealizando las Ecuaciones 13 y 14, mediante una transformación logarítmica, y posteriormente utilizando mínimos cuadrados. Este proceso exige el uso de una variable dependiente asumida como variable proxy de accesibilidad. Se tomaron los datos del MT del año base 2019 (viajes producidos y atraídos) de cada zona, que tienen relación directa con la accesibilidad activa y pasiva, donde a mayor cantidad viajes el valor de accesibilidad es mayor. La accesibilidad activa y pasiva quedan formuladas bajo las variables coste (tiempo de viaje entre zonas considerando congestión), empleos y población de cada zona. Los resultados se resumen en la Tabla 4.

Variable	Accesibilidad Activa		Accesibilidad Pasiva	
	β	P-Valor	β	P-Valor
Ln_Job/Ln_Pop	0,98	0,000	0,87	0,000
Cost	-0,015	0,000	-0,017	0,000
R²	0,97		0,97	

Tabla 4: Parámetros establecidos para los modelos de accesibilidad

La calibración del parámetro coste presentó un signo negativo en ambos casos, con un mayor valor en el caso de la accesibilidad pasiva, hecho que es coherente con la teoría, ya que los viajes relacionados con el trabajo muestran de media una menor impedancia.

4. RESULTADOS SOBRE LA EQUIDAD EN EL TRANSPORTE

El análisis de la oferta de transporte se realizó con la información digitalizada mediante el software Visum y codificación proveniente de Metrolínea considerando: paradas y rutas (977 paradas y 44 rutas de servicio); nivel de servicio en cada parada, número de rutas y frecuencia en día laborable; y evaluación del ISTP por zona con un área de influencia concéntrica de 300 metros desde cada parada. Los valores finales son normalizados en una escala entre 0 y 100 con el objeto de ser comparados con los índices de demanda potencial. El análisis de demanda se realizó por medio del índice INSTP desarrollando un análisis Multi-criterio para la ponderación mediante el método de jerarquías analíticas (AHP) (Saaty, 1995).

Así, se compararon por pares las variables: tasa de trabajadores, tasa de población de recursos bajos, tasa de actividades económicas y valor de accesibilidad al empleo en la zona. La valoración fue realizada por un equipo de seis expertos mediante la plantilla de evaluación AHP propuesta por Goepel (2013) obteniéndose unas ponderaciones para la población de ingreso bajo de 49,8 %, para la accesibilidad al empleo de 21,9 %, para la tasa de trabajadores de 20,2 % y para la tasa de actividades económicas del 8 %. Los valores son normalizados para poder ser comparados con los índices de oferta (véase la Tabla 5).

Zona	INSTP	ISTP	IDOD	Zona	INSTP	ISTP	IDOD
1	80,91	15,94	64,97	17	35,66	10,40	25,26
2	68,30	33,84	34,46	18	28,72	55,56	-26,84
3	27,97	74,30	-46,33	19	0,00	27,49	-27,49
4	31,73	14,21	17,52	20	30,70	22,63	8,07
5	39,19	15,64	23,55	21	100,00	73,99	26,01
6	24,96	56,40	-31,44	22	32,57	36,05	-3,48
7	36,69	23,74	12,95	23	33,23	57,80	-24,57
8	54,04	6,59	47,45	24	36,91	37,28	-0,37
9	33,60	50,15	-16,55	25	62,40	28,04	34,36
10	36,04	92,51	-56,47	26	41,87	0,00	41,87
11	37,15	76,86	-39,72	27	45,44	5,50	39,94
12	15,19	60,82	-45,63	28	43,07	1,53	41,54
13	11,66	75,71	-64,05	29	47,13	90,52	-43,38
14	61,72	12,71	49,01	30	43,12	100,00	-56,88
15	2,32	50,02	-47,70	31	47,39	5,75	41,64
16	30,37	26,25	4,12				
Total	1.220,03	1.238,20	- 18,16				
Media	39,36	39,94	-0,59				
Max.	100,00	100,00	64,97				
Min.	0,00	0,00	- 64,05				
Dev. Std.	20,30	29,22	37,81				

Tabla 5: Índices del nivel de oferta de transporte público (ISTP), necesidad de transporte público (INSTP) y disparidad oferta-demanda (IDOD)

En el caso de la accesibilidad al empleo y tasa de actividades económicas se utilizó un valor inverso, para reflejar que, a mayor valor menor necesidad de transporte público, es decir, las zonas con más comercio y más accesibilidad al empleo tienen una menor necesidad de transporte público para que su población acceda a esas oportunidades.

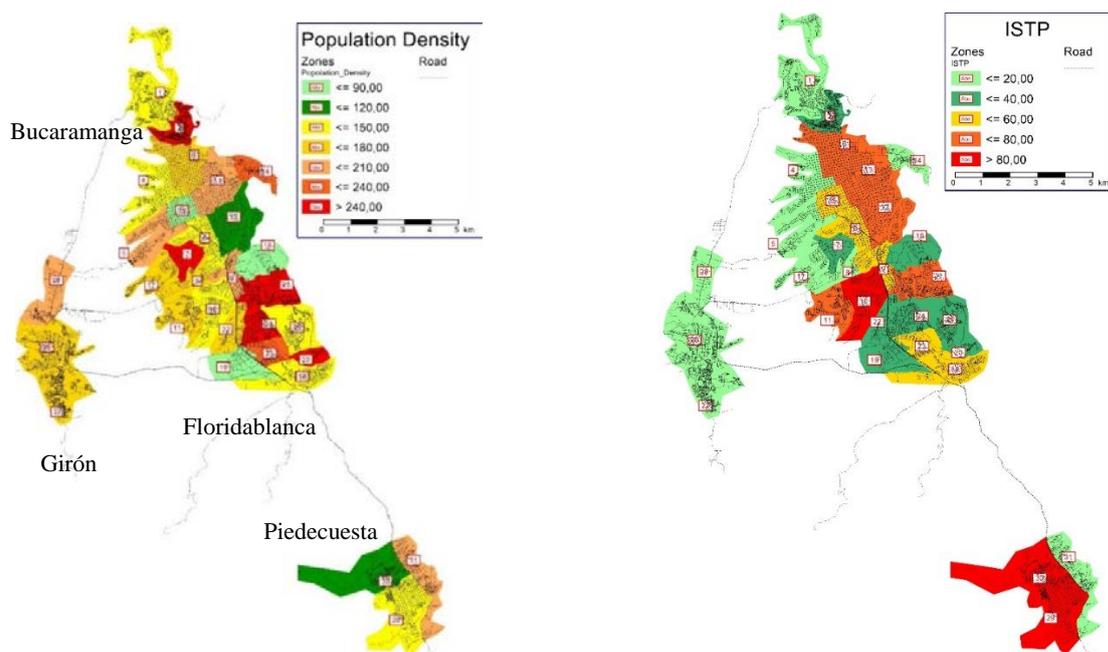


Figura 4: Distribución espacial de la densidad poblacional e indicador ISTP

La figura 4 muestra la distribución de población en el AMB. Destacan las zonas Ciudadela, Nororiental, Morrórico, Caldas Reposo, Valencia, Bucarica y Lagos como las más pobladas, con uso netamente residencial y población de ingreso bajo. Las zonas más comerciales son Centro, Cabecera del Llano, La Concordia, Cañaveral y casco antiguo de Piedecuesta, presentando menos densidad de población, lo que implica que las personas en general residen lejos de su lugar de trabajo. El índice ISTP permite, por su parte, identificar zonas con mayor oferta de servicio: San Francisco, Oriental, Cabecera del Llano y Provenza, en el centro del municipio Bucaramanga. En cambio, las zonas Caldas Reposo en Floridablanca, las zonas centro y norte de Piedecuesta, junto al municipio Girón, lucen totalmente excluidas del servicio, es decir, sin infraestructura óptima que satisfaga la demanda de viajes.

En contraste, se puede observar sobre-provisión de oferta de transporte público en zonas de uso comercial favoreciendo el desplazamiento con fines laborales. Los resultados del modelo muestran que las tres zonas de Girón con indicador bajo de ISTP, aunque pertenece al AMB, están desconectadas del sistema de transporte público. En cuanto a las zonas con mayor necesidad de transporte en el municipio Floridablanca, estas son: Caldas, Reposo y la Cumbre. De igual forma, el municipio de Piedecuesta presenta gran necesidad al presentar un proceso de expansión urbana sin que el servicio se haya adecuado. El indicador de disparidad oferta-demanda, IDOD, muestra que las zonas con valor negativo tienen una oferta de servicio muchísimo mayor a la necesidad estimada.

En cambio, cuanto mayor sea este indicador significa que la provisión de infraestructura y frecuencia de rutas es insuficiente para satisfacer la necesidad estimada (véase la Figura 5).

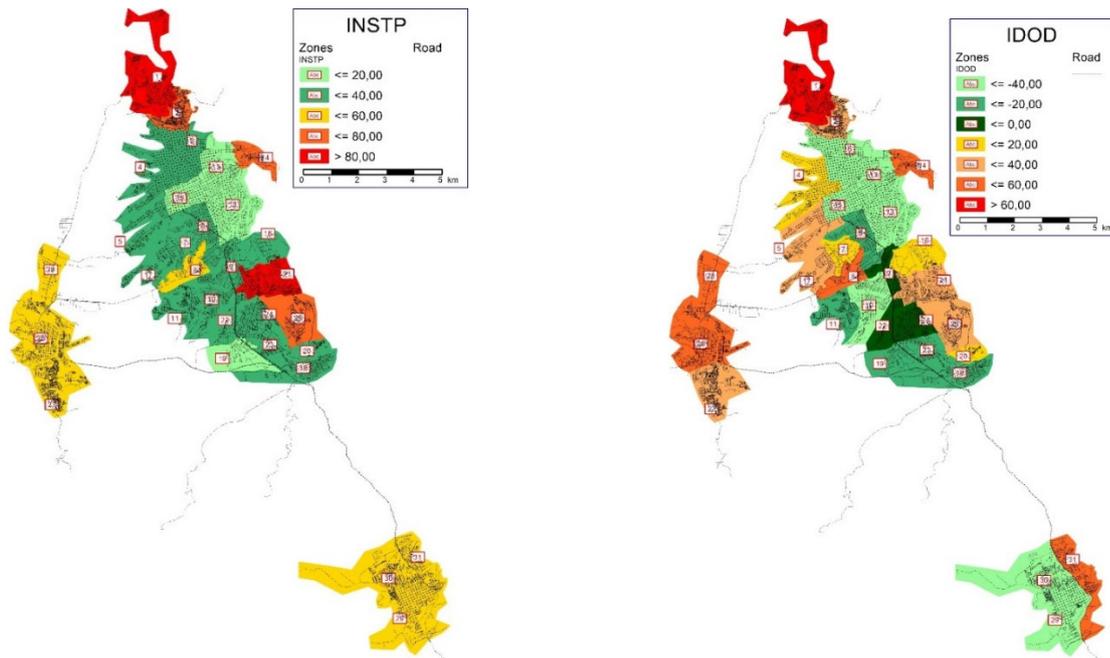


Figura 5: Distribución espacial de los índices INSTP e IDOD

En Bucaramanga, las zonas con indicador negativo son las de uso comercial: San Francisco, Oriental, Cabecera del Llano y Centro. Estas zonas presentan un sobre-aprovisionamiento de infraestructura y servicio justificable, aunque no puede tener más residentes ni población de bajos recursos, ya que presentan en promedio, el 40 % de todos los empleos del AMB. Las áreas residenciales que tienen aprovisionamiento extra en este municipio son: Concordia, Provenza y Sur. Las demás zonas periféricas tienen indicadores positivos lo que señala que podría ser necesario aumentar la infraestructura y la planificación de nuevos servicios en esas zonas. El municipio de Floridablanca es el segundo más grande en términos de área y población, todas sus áreas tienen residentes de bajos recursos y presentan un valor positivo en su indicador IDOD, estas son: Caldas Reposo, La Cumbre y Bucarica, lo que señala que el sistema de transporte público de esta área presenta cierto aislamiento. En el municipio Girón el índice revela la necesidad de una mayor oferta del servicio de transporte público en todas sus zonas pues sus indicadores de IDOD son los más altos en el AMB, es decir, es el municipio peor servido. El municipio de Piedecuesta, a pesar de estar más alejado del centro del AMB, tiene un índice elevado de servicio en relación a la demanda pues sus indicadores en dos zonas de tres son negativos.

En general el sistema de transporte satisface el desplazamiento hacia cuatro zonas: San Francisco, Oriental, Cabecera del Llano y Centro, mientras que el sistema no facilita una movilidad transversal, y en caso de permitirse, implica un desplazamiento que toma mucho tiempo y varios trasbordos, lo que causa desequilibrio en el acceso a los equipamientos y servicios, potenciando el uso de vehículo privado para este tipo de movilidad. El modelo de rutas establecido como Periferia–Centro de Bucaramanga–Periferia, no contempla un municipio como Floridablanca, donde hay zonas con alta densidad de comercio. Este análisis

permite ver que el sistema de transporte público contribuye a la consolidación de áreas urbanas periféricas aisladas del conjunto urbano central, debido a que se encuentran conectadas por una sola ruta de servicio troncal. Por su parte, la equidad horizontal, formulada a partir de la densidad de población e ISTP, arrojan resultados de disparidad muy alta dentro del AMB. Las zonas con valor mayor corresponden a áreas con mucha población y servicio ineficiente de transporte público, destacando en Bucaramanga: Norte, Nororiental, Occidental, Morrórico, García Rovira, Mutis y Sur. Todas las zonas ubicadas en la periferia y con residentes de bajo ingreso del municipio Girón tienen valores muy altos en comparación a las demás zonas, señalando una falta de servicios de transporte público. En Piedecuesta solo una de sus tres zonas presenta un servicio ineficiente y el mayor equilibrio de equidad horizontal se da en el centro de los municipios de Bucaramanga y Floridablanca, donde se tiene exceso de servicio e infraestructura frente a su baja densidad demográfica. Es importante resaltar que el SITM tiene en estas áreas varias rutas troncales con carril exclusivo que cruza la ciudad de extremo a extremo, desde Bucaramanga hasta Piedecuesta. Además, el resto de las rutas, ya sean alimentadoras o complementarias, deben como mínimo realizar una parada en las estaciones, lo que ayuda a aumentar el nivel de aprovisionamiento del servicio. En general, ocho zonas se destacan en la equidad horizontal: Morrórico, García Rovira, Mutis, Sur Occidente, Girón Norte, Casco Antiguo Girón, Girón Sur y Piedecuesta Oriente (véase la Figura 6).

La equidad vertical, evaluada por medio del ISTP e INSTP, refleja la relación entre oferta y necesidad de todas las zonas consolidadas, donde zonas con un alto valor corresponden a áreas con alta necesidad de transporte público y bajo nivel de servicio. Es importante resaltar, el desajuste que tiene Girón en todos los indicadores evaluados resultando el área más perjudicada por falta de servicio. Si evaluamos al municipio de Bucaramanga y Floridablanca como una sola entidad (dada su cercanía) podemos deducir que hay ocho zonas que presentan alta densidad de población y muy bajo nivel de servicio de transporte público, en comparación con el resto, siendo estas: Norte, Nororiental, Morrórico, García Rovira, Mutis, Sur Occidente, Caldas Reposo y La Cumbre, siendo nuevamente las zonas con residentes de ingreso bajo las más perjudicadas. El SITM tiene por lo tanto un efecto muy poco positivo en zonas con población de bajo ingreso, como puede verse en todos los indicadores, incluso cuando existe una gran concentración de población. Además, el actual sistema de transporte no contempla las zonas en las periferias de los municipios de Bucaramanga y Floridablanca, ya que cuanto más alejada está la zona de su eje troncal, peor es el servicio de transporte ofrecido. Estas condiciones hacen que estas zonas, en su mayoría con población de bajos ingresos, presenten peores condiciones de acceso al empleo, lo que deteriora aún más sus oportunidades. Además, en zonas de mayores ingresos, la falta de oferta de transporte público incentiva el uso del vehículo privado.

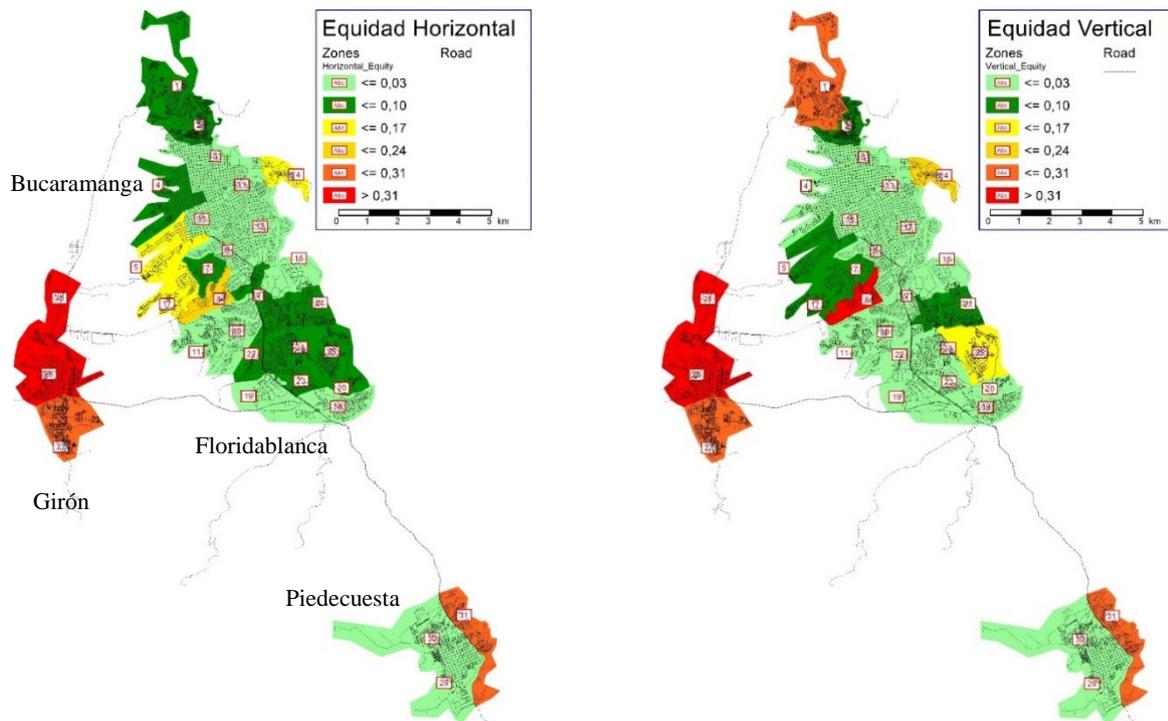


Figura 6: Distribución espacial Equidad Horizontal y Equidad Vertical por zona

Evaluando la equidad horizontal y vertical y la igualdad en la distribución por medio de la curva de Lorenz y coeficiente de Gini, se comprueba que la disparidad entre oferta y necesidad del servicio de transporte público es notable. Las curvas mostradas en la Figura 7 señalan el alejamiento notorio de la situación de igualdad total, tanto según la densidad de población de los residentes en cada zona como en la necesidad social de transporte público estimada.

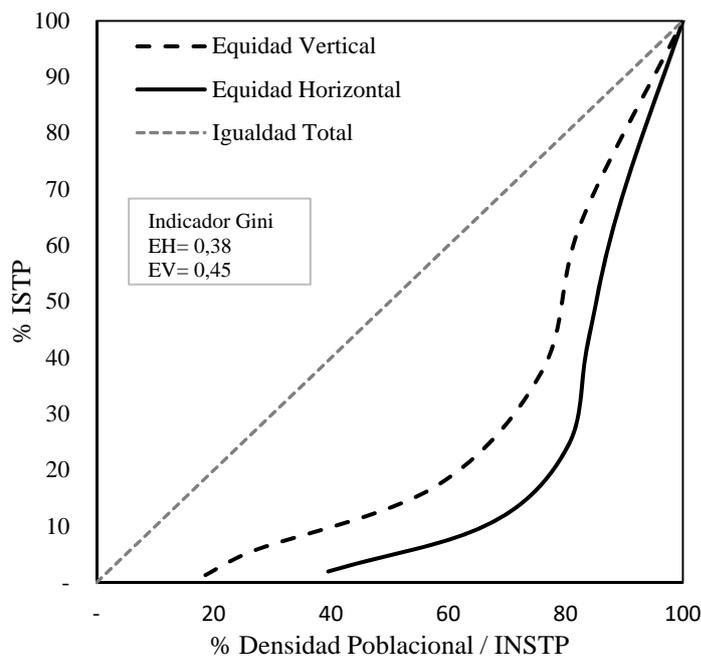


Figura 7: Curvas de Lorenz a partir de índice de equidad horizontal y vertical

El coeficiente de Gini muestra un valor menor de disparidad en equidad horizontal (0,38) evaluado a partir de la densidad poblacional versus el nivel de servicio del transporte público, comparado con la equidad vertical (de 0,45) determinada mediante los índices ISTP e INSTP. Los valores de estos indicadores son diferentes a cero, lo que representa una falta de equilibrio entre la necesidad y oferta del transporte público, tanto en cuantía como en características socioeconómicas.

5. CONCLUSIONES, DISCUSIÓN Y LIMITACIONES

En esta ponencia se ha realizado un análisis de la equidad espacial ofertada por el SITM en el AMB – Colombia. Para ello se ha estimado el desequilibrio existente entre la necesidad social y los servicios ofertados de transporte público mediante los Índices ISTP y INSTP. Además, se ha calculado el coeficiente de Gini a partir de datos proporcionados por el modelo de interacción entre el transporte y usos del suelo AMB-LUTI. Este modelo ha permitido obtener los datos sobre la oferta de transporte público y la demanda potencial en las distintas zonas, basándose en el software de transporte Visum y código propio programado en el lenguaje Python.

El AMB constituye un área urbana en desarrollo donde el sistema de transporte público presenta debilidades, pudiéndose equiparar a otros territorios metropolitanos similares, afectados por el desarrollo rápido y desorganizado de los usos del suelo y la falta de información para imponer una planificación del transporte más efectiva. Entre estas debilidades se encuentra la de una estructura de la red de transporte público basada en una sola ruta troncal de la que se benefician sólo las zonas centrales de los municipios, constituyendo un sistema rígido que no facilita la movilidad transversal. La falta de interconexión entre los cuatro municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta ocasiona una baja equidad en la oferta del transporte público e indica la necesidad de reestructurar el sistema. Esta reestructuración debería basarse en medidas como: colocar rutas de servicio en función de la densidad poblacional, tener en cuenta las zonas con crecimiento demográfico y urbanístico, relocalizar las paradas en función de las zonas en aras de poder brindar un servicio más equitativo evitando el sobreaprovisionamiento en algunas áreas, planificar las frecuencias en función de la necesidad de servicio público de las diferentes zonas y adaptar la infraestructura para satisfacer la demanda de movilidad entre municipios, no solo hacia y desde Bucaramanga. En virtud de la dificultad para realizar estos cambios por los costes elevados que pueda representar, es aconsejable disponer de una metodología que permita simular distintos escenarios, incorporando cambios leves que faciliten poco a poco la adecuación de la oferta a la demanda como medida más viable e inmediata a corto plazo.

El AMB presenta por lo tanto desequilibrios notables en la prestación de servicio del SITM, al no facilitar un acceso adecuado al empleo desde todas las áreas. Se puede observar gran dependencia de ciertas rutas del centro urbano comercial, sin contemplar los nuevos centros

urbanos que se están desarrollando en la actualidad. Así, en algunos municipios el servicio de transporte público se está quedando obsoleto, no se está adaptando a las modificaciones rápidas de los usos del suelo, y los ciudadanos están migrando paulatinamente de forma progresiva hacia un uso más intenso de transportación individual que implica no solo al vehículo particular sino también al uso de la motocicleta como modo de desplazamiento cotidiano.

La metodología propuesta constituye un avance en este sentido, como integración de técnicas de análisis de datos geográficos y socioeconómicos que permitan evaluar la equidad en el servicio de transporte público en Áreas Metropolitanas. La interrelación de los sub-modelos de transporte, localización residencial, localización de actividades económicas e indicadores de accesibilidad permite tener disponible un modelo útil a la hora de medir los efectos dinámicos de cambios que se ejecuten en el sistema de transporte. Las técnicas de medición de equidad, tanto horizontal como vertical, permiten además una evaluación más completa de estos cambios en términos de impacto social.

El modelo AMB-LUTI presenta ciertas limitaciones que es importante mencionar de cara a trabajos ulteriores. La falta de información desagregada del estrato social por zona afecta el uso del modelo cuando se desee dar información a ese nivel de detalle, dado que se utilizaron valores totales para el AMB. No obstante, los resultados obtenidos fueron buenos, ya que el modelo permite una interpretación global de las condiciones de movilidad existente en día laborable en toda el Área Metropolitana. La metodología implementada, la cual combina el análisis de equidad del servicio de transporte público y el modelo LUTI, puede ser una herramienta útil para evaluar distintos escenarios de planificación en otras áreas de estudio.

REFERENCIAS

BROTCHIE, J. F., DICKEY, J. W., & SHARPE, R. (1980). TOPAZ: General Planning Technique and its Applications at the Regional, Urban, and Facility Planning Levels. Berlin: Germany: Springer-Verlag.

ALCALDIA DE BOGOTA. (2011). Movilidad Bogota. Recuperado el 18 de Agosto de 2019, de http://www.movilidadbogota.gov.co/web/sdm_entrega_resultados_de_la_encuesta_de_movilidad_para_bogot_2011.

ALCALDIA DE BUCARAMANGA. (2014). Plan de Ordenamiento Territorial . Recuperado el 05 de Noviembre de 2019, de <https://www.bucaramanga.gov.co/laruta/ordenamiento-territorial/>.

ALCALDIA DE FLORIDABLANCA. (2018). Plan de Ordenamiento Territorial . Recuperado el 05 de Noviembre de 2019, de <http://www.floridablanca.gov.co/Transparencia/Paginas/Planeacion.aspx>.

ALCALDIA DE GIRON. (2010). Plan de Ordenamiento Territorial . Recuperado el 05 de Noviembre de 2019, de <http://www.giron-santander.gov.co/Transparencia/Paginas/Planeacion>

ALCALDIA DE PIEDECUESTA. (2017). Plan de Ordenamiento Territorial. Recuperado el 05 de Noviembre de 2019, de <http://www.alcaldiadepiedecuesta.gov.co/Transparencia/Paginas/Planes-Programas-y-Proyectos.aspx>

ALONSO , W. (1964). Location and Land Use: Toward a general theoru of land rent. Cambridge: MA: Harvard University Press.

ANAS, A. (1983). Review: Residential Location Markets and Urban Transportation: Economic Theory, Econometrics and Policy Analysis with Discrete Choice Models. *Environment and Planning B*, 10(4), 487-488.

ANDREWS, R. B. (1953). Mechanics of the Urban Economic Base Historical Development of the Base Concept. *Land Economics*, 29(2), 161-167.

ARDILA, E. K. (16 de Mayo de 2019). Vanguardia Liberal. Recuperado el 20 de Nov de 2019, de <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/como-salir-de-este-cuello-de-botella-en-bucaramanga-FC949654>

AREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA. (03 de 05 de 2019). Observatorio Metropolitano. Obtenido de <http://www.observatoriometropolitano.com.co:8080/>

BARRETT, C., BECKMAN, R., BERKBIGLER, K., BISSET, K., BUSH, B., BURRIS, K., EUBANK, S. (10 de Diciembre de 2002). Transportation ANalysis SIMulation System (TRANSIMS). Portland Study Report.

CAMPOREALE, R., CAGGIANI, L., & OTTOMANELLI, M. (2019). Modeling horizontal and Vertical Equity in the public transport desing problem: A case study. *Transportation Research Part A*, 125, 184-206.

CASCETTA, E. (2001). *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods* (Vol. 49). Napoli, Italia: Springer - Science + Business Media, B.V. doi:10.1007/978-1-4757-6873-2

CASCETTA, E. (2009). *Transportation systems analysis: Models and applications* (2 ed.). New York: Springer.

CASTIGLIONE, J., BRADLEY , M., & GLIEBE, J. (2015). Activity-Based Travel Demand Models: A Primer. *Transportation Economics*, (SHRP 2) Report S2-C46-RR-1.

CORDERA , R., IBEAS, A., DELL´OLIO, L., & ALONSO , B. (2018). Land Use - Transport Interaction Models. Santander,Cantabria, España: CRC Press.

CORDERA, R., COPPOLA, P., IBEAS, A., & DELL´OLIO, L. (2013). LUTI Model for the Metropolitan Area of Santander. *Journal of Urban Plannign and Development*, 139(3), 153-165.

- CURRIE, G. (2004). Gap analysis of public transport needs: measuring spatial distribution of public transport needs and identifying gaps in the quality of public transport provision. *Transportation Research Record-Series*, 1895(1), 137-146.
- CURRIE, G. (2010). Quantifying spatial gaps in public transport supply based on social needs. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 31-41.
- DALVI, M., & MARTIN, K. (1976). The measurement of accessibility: some preliminary results. *Amsterdam Transportation*, 1(5), 17-42.
- DANE. (2019). Demografía y Poblacion. Recuperado el 5 de Noviembre de 2019, de <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/>
- DELBOSC, A., & CURRIE, G. (2011). Using Lorenz curves to assess public transport equity. *Journal of Transport Geography*, 19(6), 1252-1259.
- DOMENCICH, T., & MCFADDEN, D. (1975). *Urban Travel Demand: a Behavioural Analysis (Statistical estimation of choice probability functions ed.)*. Amsterdam: North-Holland Publishing.
- ECHENIQUE, M. (2011). Land Use / Transport Models and Economic Assessment. *Research in Transportation Economics*, 31(1), 45-54.
- GEURS, T., & VAN WEE, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127-140.
- GOEPEL, K. D. (2013). Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making In Corporate Enterprises – A New AHP Excel Template with Multiple Inputs. *Proceedings of the International Symposium on the Analytic Hierarchy Process*. Kuala Lumpur 2013.
- GUZMAN, L., GOMEZ, A., & RIVERA, C. (2015). Un modelo de generacion de viajes dentro de un entorno dinamico. *Barranquilla: IX Congreso Colombiano de Ingenieria de Transporte*.
- GUZMAN, L. A., GOMEZ, A. M., & RIVERA, C. (2017). A Strategic Tour Generation Modeling Within a Dynamic Land-Use and Transport Framework: A Case Study of Bogota, Colombia. *Transportation Research Procedia*, 25, 2536-2551.
- HANSEN, W. (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Planning Association*, 25(2), 73-76.
- HERBET, J., & STEVENS, B. (2006). A Model of the Distribution of Residential Activity in Urban Areas. *Journal of Regional Science*, 2(2), 21-36.
- HSU, C.-I., & GUO, S.-P. (2006). CBD Oriented Commuters' Mode and Residential Location Choices in an Urban Area with Surface Streets and Rail Transit Lines. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(4), 235-246.
- IACONO, M., LEVINSON, D., & EL-GENEIDY, A. (2007). Models of Transportation and Land Use Change: A Guide to the Territory. *Journal of Planning Literature*, 22(4), 323-340.

- JOHN, O. (2005). Accessibility in the Luci2 Urban Simulation Model and the Importance of Accessibility for Urban Development. the Netherlands: Elsevier, Eds, 297-324.
- JOVICIC, G., & HANSEN, C. (2003). A passenger travel demand model for copenhagen. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37(4), 333-349.
- LEONTIEF, W. (1966). *input/output economics*. New York: Oxford University Press.
- LOWRY, I. S. (1964). *A Model of Metropolis*. Santa Monica: CA: Rand Corporation.
- LUCE, R., & SUPPES, P. (1965). Preference, Utility, and Subjective Probability (Gneral algebraic choice theories ed.). New York, USA: Handbook of Mathematical Psychology.
- MANRIQUE , J. (2016). *Accesibilidad: Elemento Fundamental para la ejecucion de infraestructura de transporte*. Tesis de Maestria . Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- MARINEZ , F., & DONOSO, P. (2001). Modeling land use planning effects: Zone regulations and subsidies. (D. Hensher, Ed.) *Travel Behaviour Research: The Leading Edge*, 647-568.
- MARQUEZ, L. (2013). *Disposicion a pagar por reducir el tiempo de viaje en tunja (Colombia): Comparacion entre estudiante y trabajadores con un modelo Logit mixto*. *Lecturas de Economia*, 45-72.
- MARTINEZ, F. (1997). MUSSA: Land Use Model for Santiago City. *Transportation Research Record*, 1552(1), 126-134.
- MCCRAY, T., & BRAIS, N. (2007). Exploring the Role of Transportation in Fostering Social Exclusion: The Use of GIS to Support Qualitative Data. *Networks and Spatial Economics*, 7(4), 397-412.
- MCFADDEN, D. (1974). conditional logit analysis of qualitative choice behaviour. *Frontiers in Econometrics*, 105-142.
- METROLINEA S.A. (2019). *Rutas del Sistema*. Recuperado el 6 de Noviembre de 2019, de <http://www.metrolinea.gov.co/v3.0/rutas-del-sistema>
- ORTUZAR, J., & WILLUMSEN, L. G. (2011). *Modelos de Transporte* . Santander, España: Ediciones Universidad de Cantabria.
- PINEDA, J. L. (17 de Junio de 2017). *Vanguardia Liberal*. Recuperado el 20 de Nov de 2019, de <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/la-crisis-del-transporte-publico-de-bucaramanga-afecta-a-77-mil-personas-EFVL400958>
- PUTMAN , S. H. (1979). *Urban Residential Location Models, Studies in Applied Regional Science (Vol. 13)*. Boston: MA: Martinus Nijhoff.
- RODRIGUE, J. P., COMTOIS, P., & SLACK , B. (2016). *The Geography of Transport Systems*. New York: Routledge.

RODRIGUEZ, J. P., COMTOIS, C., & SLACK, B. (2006). *The Geography of Transport Systems*. New York: Routledge.

RUIZ, M., SEGUI PONS, J. M., LLADO, J., & MARTINEZ, M. R. (2016). Evaluación de la equidad del servicio de transporte público: El caso de Palma de Mallorca. *Estudios Geograficos*, 77(281), 619-646.

SAATY, T. (1995). Transport planning with multiple criteria: The analytic hierarchy process applications and progress review. *Journal of Advanced Transportation*, 29(1), 81-126.

SALAS OLMEDO, M. H., WANG, Y., & ALONSO, A. (2017). Assessing accessibility with local coefficients for the LUTI model MARS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 64, 194-203.

SALVINI, P., & MILLER, E. (2005). ILUTE: An Operational Prototype of a Comprehensive Microsimulation Model of Urban Systems. *Networks and Spatial Economics*, 5(2), 217-234.

SIMMONDS, D. (1999). The design of the DELTA land - use modelling package. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 26(5), 665-684.

STRAUCH, D., MOECKEL, M., WEGENER, M., GRAFE, J., MUHLHANS, H., RINDSFUSER, G., & BECKMANN, K. (2005). Linking Transport and Land Use Planning: The Microscopic Dynamic Simulation Model ILUMASS. In *Geodynamics*, Eds, 295-311.

TORRENS, P. (2000). *How Land-Use-Transportation Models Work*. London, UK: CASA Working Papers 20.

UNIDAD SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA. (2012). *Que es un BRT, o la implementación del Metrobus en la ciudad de Buenos Aires, Argentina*. Buenos Aires, Argentina: ONU, Cepal.

WADDELL, P. (2002). UrbanSim: Modeling Urban Development for Land Use, Transportation, and Environmental Planning. *Journal of the American Planning Association*, 68(3), 297-314.

WILLIAMS, H. (1976). A comparison of some calibration techniques for doubly constrained models with an exponential cost function. *Transportation Research*, 10, 91-104.

WILLIAMS, H. (1977). On the formation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit. *Environment and planning*, 9, 285-344.

WILSON, A. G. (1970). *Entropy in Urban and Regional Modelling*, Monographs in Spatial and Environmental Systems Analysis 1. London: UK: Pion.

WRIGHT, L., & HOOK, W. (2007). *Bus Rapid Transit Planning Guide*. New York, USA: Transportation & Development Policy.