

**ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE
TRANSPORTE AEROSUSPENDIDO, DESDE UN ENFOQUE DE ACCESIBILIDAD
ESPACIAL URBANA.**

Caso de estudio: MIO-CABLE, Santiago de Cali

Juan David Morales Bonilla.



Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Ingeniería Topográfica
Santiago de Cali
Septiembre 2019

**ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE
TRANSPORTE AEROSUSPENDIDO, DESDE UN ENFOQUE DE ACCESIBILIDAD
ESPACIAL URBANA.**

Caso de estudio: MIO-CABLE, Santiago de Cali

Juan David Morales Bonilla.

Proyecto de grado para optar por el título de:
Ingeniero Topográfico

Directora: Jackeline Murillo Hoyos PhD.
Codirector: Ciro Jaramillo Molina PhD.

Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Ingeniería Topográfica
Santiago de Cali
Septiembre 2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL DIRECTOR DE TESIS

FIRMA DEL CODIRECTOR DE TESIS

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

Santiago de Cali, septiembre de 2019

DEDICATORIA

*A mi madre y a mi padre, por su esfuerzo y sacrificio para otorgarme las condiciones necesarias
para cumplir este objetivo.*

A mis hermanos me alentaron en todo momento y no me permitieron desfallecer.

A las personas que acompañaron el proceso y confiaron en mí.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a la vida, por haberme permitido culminar esta etapa satisfactoriamente.

A mis padres Luis Alberto Morales Medina y María Janeth Bonilla Garzón por brindarme la oportunidad para llegar hasta aquí.

A los Doctores Jackeline Murillo y Ciro Jaramillo, por su disposición en todo momento, su acompañamiento, sus consejos, su paciencia y sus aportes.

A las entidades que facilitaron la información para llevar a cabo esta investigación.

A mis hermanas Angela y Sofi, mi hermano Luigi, mis tías Aracelly, Leyda, Dora, Stella que siempre estuvieron pendientes de mí en este proceso y me animaron a seguir adelante.

A Eli, por su amor, su apoyo constante en este proceso, su confianza en mí, su sacrificio y paciencia.

A Lorena por sus aportes y disposición, a Bryan, Ricardo, Erika, Oscar, Carlos y demás amistades que confiaron en mí para sacar adelante este trabajo.

A todas las personas que de alguna u otra manera hicieron parte de mi formación y acompañaron este proceso.

RESUMEN

Esta investigación evalúa el grado de incidencia de los sistemas de transporte en las condiciones de acceso y participación de la población residente en la Comuna 20 de Santiago de Cali, un territorio caracterizado por condiciones topográficas y socioeconómicas que limitan la movilidad desde y hacia la zona. En el análisis presentado se evalúa la condición de accesibilidad territorial urbana desde tres enfoques que permiten evaluar integralmente la oferta y calidad del servicio de los modos que operan en la zona teniendo en cuenta su infraestructura, la capacidad operativa y la cobertura; así mismo, se detalla el gradiente generado en los tiempos de viaje, área y población cubierta por la implementación de un sistema de transporte por cable determinando su impacto en la movilidad de la Comuna. Este estudio tiene como propósito servir como medida de desempeño de la efectividad de los sistemas de transporte público en áreas de pequeña escala; además, convertirse en un insumo metodológico para la planificación del transporte y ordenamiento territorial.

ABSTRACT

This research evaluates the degree of incidence of transport systems in the conditions of access and participation of the resident population in the Comuna 20 of Santiago de Cali, a territory characterized by topographic and socioeconomic conditions that limit mobility for and from the area. In the analysis presented, the condition of urban territorial accessibility is evaluated from three approaches that allow the comprehensive assessment of the supply and quality of service of the transport systems operating in the area, taking into account its infrastructure, operational capacity and coverage; Likewise, is detailed the gradient generated in the travel times, area and population covered by the implementation of a cable transport system determining its impact on the mobility of the Commune. This study aims to serve as a measure of performance in the effectiveness of public transport systems in small-scale areas; In addition, to become a methodological input for transport planning and territorial planning.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
3.	OBJETIVOS	5
4.	JUSTIFICACIÓN	6
5.	MARCO CONTEXTUAL	7
5.1	MARCO CONCEPTUAL	8
5.1.1	SISTEMAS DE TRANSPORTE: MODOS, DISTANCIA Y VIAJES.....	8
5.1.2	ACCESIBILIDAD Y MOVILIDAD	9
5.1.3	INDICADORES Y NIVELES DE ACCESIBILIDAD.....	10
5.1.4	CONECTIVIDAD	10
5.1.5	ANÁLISIS ESPACIAL Y ESTADÍSTICA ESPACIAL	11
5.1.6	EXCLUSIÓN SOCIAL Y SEGREGACIÓN ESPACIAL	12
5.2	MARCO TEÓRICO.....	12
5.2.1	MEDIDAS TOPOLÓGICAS	12
5.2.2	MEDIDAS DESAGREGADAS	15
5.2.3	MEDIDAS AGREGADAS.....	16
5.2.4	MEDIDAS COMPLEMENTARIAS Y VALIDACIÓN.....	20
5.3	MARCO REFERENCIAL.....	22
6.	METODOLOGÍA.....	25
6.1	FASE I: PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN.....	29
6.1.1	RECOLECCIÓN Y DEPURACIÓN	30
6.1.2	UNIDADES DE ANÁLISIS Y ESCENARIOS DE EVALUACIÓN	36
6.1.3	CREACIÓN DE BASES DE DATOS.....	39
6.2	FASE II: CÁLCULOS Y MEDICIONES	42
6.2.1	GENERACIÓN DE REDES DE ANÁLISIS Y CADENAS DE VIAJE.....	43
6.2.2	CREACIÓN DE MATRICES ORIGEN – DESTINO	44
6.2.3	EVALUACIÓN DE CONDICIÓN DE ACCESIBILIDAD URBANA.....	48
6.3	FASE III: ANÁLISIS DE RELACIONES	57
6.4	FASE IV: ANÁLISIS DEL IMPACTO TERRITORIAL Y EXCLUSIÓN.....	57
7.	RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN	58
7.1	INFORMACIÓN BASE PARA LA BDG.....	58
7.2	ANÁLISIS DE REDES Y EVALUACIÓN DE ACCESIBILIDAD URBANA	60
7.2.1	CADENAS DE VIAJE Y MATRICES ORIGEN – DESTINO.....	60
7.2.2	TIEMPOS DE VIAJE – MODELO DE ACCESIBILIDAD GEOGRÁFICA	62
7.2.3	EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE ACCESIBILIDAD URBANA	70
7.3	ANÁLISIS DE RELACIONES	91
7.3.1	ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA.....	92
7.3.2	ESCENARIO 1 – 2014	95
7.3.3	ESCENARIO 2 – 2019	102
7.4	CUANTIFICACIÓN DE IMPACTO EN LA ACCESIBILIDAD Y EXCLUSIÓN ..	110
8.	CONCLUSIONES	117
	REFERENCIAS.....	120

Lista de Figuras

Figura 1. Zona de estudio.....	28
Figura 2. Flujograma metodológico.....	29
Figura 3. Datos colectados mediante aplicación Geo Tracker	33
Figura 4. Zona de análisis de transporte	38
Figura 5. Mapa de pendientes reclasificado.....	59
Figura 6. Redes de transporte para ambos escenarios	60
Figura 7. Comparación de cadenas de viaje	61
Figura 8. Curvas isócronas de la red de camperos.....	63
Figura 9. Curvas isócronas de la red de STM	64
Figura 10. Áreas de influencia del sistema tipo campero	65
Figura 11. Áreas de influencia del sistema de transporte masivo	65
Figura 12. Distribución de TMV según el modo hasta la terminal Cañaveralejo.....	68
Figura 13. Densidad de infraestructura vial de la red de camperos.....	72
Figura 14. Densidad de infraestructura vial de la red de alimentadores.....	73
Figura 15. Factor de ruta integral para la red de camperos	75
Figura 16. Factor de ruta integral para la red de alimentador.....	76
Figura 17. Índice de trazado-velocidad para la red de camperos	77
Figura 18. Índice de trazado-velocidad para la red de alimentador.....	77
Figura 19. Índice de provisión de transporte público	79
Figura 20. Indicador de gravedad.....	86
Figura 21. Índice de accesibilidad escenario 1.....	89
Figura 22. Índice de accesibilidad escenario 2.....	90
Figura 23. Distribución de población potencial de las ZAT's.....	92
Figura 24. Dispersión de parámetros de redes de transporte	94
Figura 25. Diagramas de dispersión de población y paradas por cada escenario.....	95
Figura 26. Diagramas de dispersión red camperos escenario 1.....	98
Figura 27. Diagramas de dispersión red de alimentadores escenario 1.....	99
Figura 28. Desviación estándar de IPTP según área y población – escenario 1.....	100
Figura 29. Desviación estándar del índice de accesibilidad por área y población – escenario 1...100	
Figura 30. Diagrama de dispersión entre IPTP e Índice de accesibilidad – escenario 1.....	101
Figura 31. Diagramas de dispersión red de camperos escenario 2.....	105
Figura 32. Diagramas de dispersión indicador de gravedad – escenario 2	106
Figura 33. Desviación estándar del IPTP según área y población – escenario 2.....	107
Figura 34. Desviación estándar del Índice según área y población – escenario 2.....	108
Figura 35. Diagrama de dispersión entre IPTP e Índice de accesibilidad – escenario 2.....	109
Figura 36. Correlación espacial del índice de accesibilidad por el Índice de Moran.....	113
Figura 37. Distribución de clústeres para el índice de accesibilidad según índice de Moran.....	114
Figura 38. Índice de Moran bi-variado entre índice de accesibilidad y estrato moda.....	115

Lista de Tablas

Tabla 1. Estadísticas generales Comuna 20.....	27
Tabla 2. Descripción de información colectada.....	32
Tabla 3. Reclasificación de mapa de pendientes.....	34
Tabla 4. Ponderación de velocidades según pendientes.....	36
Tabla 5. Parámetros operacionales alimentadores día hábil.....	40
Tabla 6. Parámetros operacionales alimentador día sábado	40
Tabla 7. Parámetros operacionales alimentador día dominical.....	40
Tabla 8. Datos operacionales rutas campero en la zona de estudio (2014-2019).....	41
Tabla 9. Infraestructura MIO CABLE	42
Tabla 10. Parámetros operacionales MIO CABLE, 2017.....	42
Tabla 11. Especificaciones de matrices y vectores origen – destino generadas	47
Tabla 12. Arcos y nodos de las ZAT's por cada red	49
Tabla 13. Factores de ponderación indicador de densidad de infraestructura vial.....	50
Tabla 14. Parámetros y factores de ponderación para el IPTP	52
Tabla 15. Parámetros para análisis de influencia	53
Tabla 16. Variables operacionales para el índice de accesibilidad	55
Tabla 17. Asignación de factores de peso para el índice de accesibilidad	55
Tabla 18. Estimaciones de viajes según partición modal de Encuesta de Metrocali	56
Tabla 19. Accesibilidad geográfica escenario 1.....	66
Tabla 20. Accesibilidad geográfica escenario 2.....	67
Tabla 21. Indicador de Kansky	71
Tabla 22. Análisis de cobertura de población escenario 1.....	82
Tabla 23. Análisis de cobertura población escenario 2.....	83
Tabla 24. Parámetros para indicador de gravedad	85
Tabla 25. Resultado indicadores de accesibilidad propuesto por GIRAO	88
Tabla 26. Tabla resumen estadística descriptiva.....	93
Tabla 27. Matriz de correlación escenario 1.....	97
Tabla 28. Matriz de correlación escenario 2.....	103
Tabla 29. Cálculo de gradiente en tiempos de viaje	111

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transporte a través del tiempo, se han convertido en un elemento fundamental en la sociedad, desempeñando un papel conector en las interacciones entre la población y su entorno, satisfaciendo así, las necesidades planteadas por la misma; este papel sumado al de las infraestructuras viales han sido objeto de estudio para el análisis del territorio desde los años sesenta (Loyola Gómez, 2005), los componentes de éste sistema deben tener una interrelación para responder de forma eficiente a la exigencia de movilidad y participación de la comunidad con su determinado territorio. Como lo plantea (Valencia, 2016): el sistema de transporte es una interacción multimodal donde se consideran elementos y movimientos que lo componen para permitir un vínculo entre objetos, bienes, personas o servicios. Dentro de una sociedad, el transporte público es el principal medio de transporte para suplir la demanda de viajes diarios de los usuarios a los puntos de interés (Dávila , 2013), (Jara & Carrasco, 2009); por tanto, es necesario que éste sistema, tenga la capacidad de circulación y conexión entre distintos puntos en la ciudades, para esto se debe tener en cuenta la accesibilidad a cada punto de referencia, la movilidad del sistema y por ultimo las conectividad con otros modos de transporte (Cheng & Chen, 2015).

La accesibilidad es un elemento clave para el transporte y la geografía en general, es una expresión directa de la movilidad en términos de personas, carga, o de información; su definición resulta ser muy amplia dependiendo del enfoque. En consecuencia, su medición se fundamenta en la forma de cómo se desarrolla el concepto (Velásquez Villada, 2018). Para este documento la accesibilidad se definió a groso modo, como la medida de capacidad de una ubicación para llegar desde, o hacia diferentes lugares; los sistemas de transporte eficientes y desarrollados ofrecen altos niveles de accesibilidad, mientras que los menos desarrollados tienen menores niveles, por tanto,

la eficiencia es menor. Existen muchas variables que influyen en la capacidad de acceso, por ejemplo la estructura de los sistemas de transporte (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2006), (Loyola Gómez, 2005); la calidad del servicio, la cobertura y participación de la población, entre otros, son factores determinantes en la medición de accesibilidad. La exclusión social tiene una relación directa con el transporte; cuando un sistema no cubre total o parcialmente la necesidad de movilidad en un determinado territorio, afecta la participación de la población en actividades de interés, impactando negativamente el bienestar de la comunidad y por tanto se genera esta exclusión, (Achuthan et al., 2010), (Kamruzzaman et al., 2016).

La Comuna 20 de Santiago de Cali está situada al occidente de la ciudad, en el pie de montaña de la cordillera occidental, por tal motivo presenta una topografía abrupta y una deficiencia en la red vial, dificultando el acceso a la comuna. Dado lo anterior, la Administración Municipal implementó un sistema de transporte aerosuspendido (MIO CABLE), para integrarlo con el sistema de transporte masivo (STM); con el objetivo de mejorar la accesibilidad desde y hacia la zona. El presente documento expone un análisis detallado de la accesibilidad en el sector, evidenciando las implicaciones de acceso a servicios desde y hacia la Comuna 20, la calidad del servicio implementado y el impacto socioespacial que generó la implementación del MIO CABLE en el sector bajo un enfoque geográfico. El estudio se estructura en tres fases de desarrollo, en la primera se realiza una contextualización de la investigación y una síntesis de la revisión literaria; en la segunda fase se caracteriza el área de estudio, los modos que influyen en ella y se plantea el marco metodológico; en la última fase se exponen los resultados y se realiza el análisis y discusión de los mismos, teniendo en cuenta los antecedentes bibliográficos relacionados con la temática. El objetivo de este estudio es analizar el impacto generado por la implementación del sistema de transporte aerosuspendido en términos de accesibilidad territorial y las posibles incidencias

sociales en las relaciones individuo-comunidad, las cuales alteran la estabilidad social y generan inequidad en el territorio (Kenyon , Rafferty, & Lyons, 2003).

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La carencia y/o deficiencia de accesibilidad a un determinado sitio, provee condiciones limitadas de participación del individuo en su comunidad, yendo en detrimento del objetivo del bienestar social y las leyes impuestas para tal fin, generando inequidad social (Titheridge, Achuthan, & Mackett, 2009). Las infraestructuras de transporte definen las distancias (Loyola Gómez, 2005), y éstas generan fricción en los desplazamientos, elevando costos y minimizando los procesos de interacción espacial entre la comunidad y los polos atractores de viajes (Vivas Pacheco, 2011), (Rodríguez Mariaca et al., 2017). En la literatura se evidencia que las zonas marginadas y de ladera presentan costos elevados en los desplazamientos, debido al nivel socioeconómico y a la capacidad monetaria; como lo plantean en sus estudios (Hernández, 2017) y (Jurado Barco & Tovar Mambuscay, 2016), la movilidad no llega a todos los estratos por igual, la elección del modo de transporte lo dicta el perfil socioeconómico del usuario el cual es directamente proporcional a su nivel de ingresos, y en este ciclo de procesos, a mayor costo de desplazamiento, mayor distancia, menos accesibilidad, menos ingresos, menor equidad y por tanto, menos participación.

La partición modal para Santiago de Cali según (Steer Davies Gleave, 2015), indica que el sistema de transporte masivo es el principal medio de transporte público. Desde el año 2009 el STM moviliza cerca de 497.338 pasajeros en día hábil (CALI EN CIFRAS 2013); según la percepción del 46% de la comunidad en la zona sur de la Ciudad, el sistema de transporte masivo cuenta con un servicio desfavorable comparado al año anterior, teniendo en cuenta que esta cifra

aumenta de acuerdo al nivel socioeconómico (Cali Cómo Vamos, 2015); además, los factores determinantes en la accesibilidad como la cobertura de las rutas y la cercanía de las estaciones, cuentan con un nivel de aceptación bajo (18% y 22% respectivamente.)

La Comuna 20 de Santiago de Cali, al estar situada en la zona de ladera expone las dificultades de acceso y mal estado de la malla vial (Plan de Desarrollo 2008-2011 Comuna 20, 2008), como lo plantean en su investigación (Giraldo Alzate et al., 2015), las condiciones sociales y geográficas de la Comuna, la planificación nula y la necesidad habitacional de la población asentada desde los años veinte provocaron una intervención por parte de habitantes y mineros los cuales empezaron a construir caminos de accesos por métodos manuales, generando de este modo, la imposibilidad de acceso por vehículos motorizados en algunas zonas de la parte alta de la comuna. La falta de oportunidades en el sector y las necesidades socioeconómicas de la población situada en esta zona de ladera, exige un desplazamiento hacia el interior de la ciudad en diferentes modos de transporte, siendo el transporte masivo el más frecuentado en los viajes diarios – 37% (Cali Cómo Vamos, 2015).

En este sector de la ciudad, el servicio de transporte es insuficiente para movilizar a la población; desde la reducción de rutas de transporte público tradicional por la implementación del STM, y la falta de cobertura de rutas de éste sistema, la comunidad debe recurrir a otras alternativas como los camperos que operan en la zona, a la fecha existen alrededor de 1000 vehículos de este tipo operando como sistema de transporte, de los cuales aproximadamente el 50% trabaja mediante cooperativas y el otro 50% lo realiza de manera informal, Collazos citado por (Villar, 2017); esta desventaja de localización a las zonas marginadas que no pueden ser suplidas por un sistema de transporte efectivo, genera altos costos de desplazamiento motivando a los usuarios a realizar

viajes por medio de la informalidad (Rodríguez Mariaca et al., 2017), o incluso realizar viajes peatonales que implican mayor esfuerzo y costo por las pendientes de la ladera.

La Administración Municipal dentro de su marco normativo decidió implementar un sistema de transporte aerosuspendido para suplir la demanda de viajes y hacerle frente a la complejidad topográfica del sector (Metrocali, 2010). Con base en lo anterior, y apoyándose en la idea que aún no se ha medido el desempeño en términos de movilidad del sistema implementado, se plantea el siguiente interrogante: *¿LA IMPLEMENTACIÓN DEL MIO CABLE MEJORÓ LA ACCESIBILIDAD TERRITORIAL URBANA EN LA COMUNA 20?*; supuesto que se discutirá en el presente análisis, evaluando los cambios en la accesibilidad de la zona por los modos de transporte público que prestan servicio desde y hacia la Comuna 20.

3. OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el impacto en la accesibilidad territorial urbana generado por la implementación del sistema aerosuspendido MIO CABLE, en la Comuna 20 de Santiago de Cali.

Objetivos específicos

- Determinar las variables propias del territorio que inciden en el comportamiento espacial de los viajes a nivel de detalle.
- Evaluar la condición de accesibilidad en dos escenarios (con y sin MIO-CABLE), bajo tres enfoques: infraestructura, servicio y operación, y cobertura.
- Analizar la relación entre los indicadores de accesibilidad y el comportamiento de las variables socioeconómicas de la Comuna.
- Detallar el impacto territorial generado por la implementación del sistema aerosuspendido, desde una perspectiva geográfica (cobertura y exclusión).

4. JUSTIFICACIÓN

La medición de accesibilidad urbana ofrece un diagnóstico de la movilidad en una población determinada, tal como lo plantea (Bautista, 2018), la evaluación operacional de una red de transporte, su conectividad, y la interacción espacial entre los actores de una comunidad son factores determinantes en el ordenamiento territorial. Por consiguiente, la medición de accesibilidad provee un soporte técnico como insumo básico en la política pública del ordenamiento del territorio.

Para inferir en un diagnóstico de la movilidad en una zona específica es necesario tener como unidad de medida el viaje realizado por el individuo o usuario, su comportamiento o variación de acuerdo al modo de transporte usado, el tiempo invertido en los desplazamientos y la incidencia de la zonificación económica o los usos del suelo en el territorio. Partiendo de la premisa que infiere que las zonas marginales y de ladera generan gran cantidad de viajes atraídos por las zonas de centralidad se pretende evaluar la condición de accesibilidad dictada por los viajes, desde y hacia la Comuna 20 por cada modo de transporte que opera en ella desde tres perspectivas: la capacidad operacional, la infraestructura que presta el mismo y la cobertura de cada sistema, teniendo como punto de conexión con el STM, la terminal Cañaveralejo.

En vista de que la cobertura espacial del corredor y estaciones de un sistema de transporte no es suficiente para inferir en la condición de accesibilidad según el área de la Comuna, es necesario un análisis completo de las cadenas de viaje para conectar con la terminal, integrando los modos de transporte que operan en la zona de estudio, las trayectorias peatonales de los usuarios hacia las paradas, rutas o estaciones, con el fin de determinar la accesibilidad integral al STM. Para determinar el impacto en los tiempos de viaje y cobertura por la implementación del MIO CABLE, es imperioso que el estudio se realice en dos escenarios de evaluación, con y sin la

implementación del sistema de transporte por cable, de este modo se proveen insumos técnicos que evidencien la capacidad operacional de cada modo y su afectación en la movilidad dentro de la Comuna.

Según las evidencias expuestas en el planteamiento de la problemática, es necesario identificar las falencias de los modos de transporte que operan en la comuna y los desequilibrios de la configuración espacial objeto de estudio, para determinar el grado de articulación del sistema y su relación con la distribución de flujos, tiempos de viaje e interacción con el territorio, ejes centrales para comprender la funcionalidad del mismo. Con base en lo anterior, se desarrolla un análisis estructurado desde la dimensión espacio-temporal de los factores que inciden en la condición de accesibilidad urbana a nivel de detalle en la Comuna 20, y así convertirse en un insumo de primer orden para la planificación del transporte, el ordenamiento territorial y como referencia metodológica para estudios posteriores.

5. MARCO CONTEXTUAL

El fundamento teórico y bibliográfico para la ejecución del presente análisis se basa en una revisión extensiva de diferentes estudios relacionados con accesibilidad, conectividad, infraestructura de transporte, análisis espacial, análisis estadístico e impactos sociales de los sistemas de transporte; estos análisis de investigación comprenden una variedad de métodos y teorías que se adaptaron como insumo referencial a las necesidades del proyecto. Este apartado se divide en tres secciones, en las cuales se detallan los términos y conceptos involucrados en el presente análisis, antecedentes de proyectos relacionados y los modelos teóricos usados por los autores en el desarrollo de sus investigaciones que sirven de insumo para este estudio.

5.1 MARCO CONCEPTUAL

En este escenario se abarcarán las expresiones o términos relacionados con la temática en desarrollo de una manera explicativa, contextualizando aquellos conceptos que aparentemente son perceptibles, sin embargo, pueden distorsionar su significado según el enfoque que se le otorgue.

5.1.1 SISTEMAS DE TRANSPORTE: MODOS, DISTANCIA Y VIAJES

Un sistema de transporte es una interacción multimodal que considera los elementos y movimientos que lo componen (Valencia, 2016), la relación entre estos responde a la necesidad de movilidad urbana. El transporte es el vector que realiza los desplazamientos (Gutiérrez 2012, citado por (Valencia, 2016)) y su grado de conexión influye directamente en la expansión del capital y crecimiento demográfico. Por su parte, el medio de transporte es el espacio por el cual se realizan los desplazamientos y el modo el vehículo empleado para tal fin; en ese sentido, para responder a la necesidad de movilidad urbana de desplazamiento, hay que tener en cuenta un factor que influye directamente en la accesibilidad: la distancia, que de acuerdo con (Loyola Gómez, 2005), la distancia es el intervalo de ir de un lugar a otro teniendo en cuenta su separación, y ésta define el grado de fricción entre el espacio geográfico influyendo directamente en el costo del desplazamiento (Rodríguez Mariaca et al., 2017)

Según (Gómez, 2005), la modelación del transporte explica el comportamiento de la demanda actual y caracteriza la oferta, por ejemplo, en una vía puede haber acceso y desplazamiento, pero en diferentes grados. Con base a ello, resulta necesario comprender la distribución espacial del sistema de transporte y su efecto en la movilidad, por lo cual se debe analizar la unidad metodológica de estudio: el viaje, que hace referencia al cambio de lugar, personas o bienes; una persona tiene muchos motivos de viaje, que se realizan por uno o varios modos en un medio de transporte en distintos horarios, evaluar el comportamiento de estos y

analizar la relación con su entorno permite obtener una representación de la movilidad y accesibilidad dentro de un territorio.

5.1.2 ACCESIBILIDAD Y MOVILIDAD

Desde hace tiempo el interés investigativo en el ámbito del transporte ha generado la capacidad de discernir algunos conceptos que desde otros enfoques se adoptan como similares, tal es el caso como a accesibilidad y la movilidad, que para efectos de otras temáticas pueden definirse como la cualidad de desplazarse en un entorno. Según (Valencia, 2016) la movilidad es una acción o práctica social de desplazamiento para acceder a bienes y servicios, la accesibilidad por su parte, aunque resulta difícil precisar su significado, en términos generales se puede definir como la condición de participación de una persona o un servicio con su entorno; la movilidad facilita dicho acceso (Hernández, 2017).

La dimensión espacial considera la geometría y el espacio como el marco de orientación, localización e interacción de un punto con su entorno, por tal motivo, el enfoque al término de accesibilidad en términos específicos de este estudio, se direcciona a la capacidad de acceso de un elemento a otro, condicionado por variables que influyen en dicho comportamiento, donde todos los actores (peatón, red vial, sistemas de transporte, etc.) desempeñan un papel conector entre los mismos para suplir la necesidad socioeconómica y la participación de la población. Así entonces, la accesibilidad es una condición o capacidad de participación con el entorno que puede evaluarse desde los lugares o las personas y su medición está condicionada por la forma en la que se desarrolle dicho concepto (Velásquez Villada, 2018), y se realiza mediante indicadores que definen el grado o la facilidad de acceso; por su parte, la movilidad urbana puede medirse cuantitativa y cualitativamente por su unidad de medida, el viaje (Gutiérrez, Nieto, Ruiz, Jaraíz, & Su Jeong, 2014) mediante modelos que describan el movimiento de los actores dentro de una

dimensión espacio temporal. En conclusión, no son términos iguales, pero están directamente relacionados, la sumatoria de desplazamientos cotidianos definen el grado de acceso, así mismo, los cambios en la accesibilidad generan un impacto directo en la movilidad urbana (Valencia, 2016).

5.1.3 INDICADORES Y NIVELES DE ACCESIBILIDAD

En primera instancia hay que dejar claridad que la accesibilidad se define como una condición, una cualidad que se expresa en términos de “mayor que o menor que” y puede conceptualizarse en dos grupos: accesibilidad a lugares y accesibilidad de personas (Martínez Sánchez, 2012), (Velásquez Villada, 2018). Dado que para este estudio se evalúa la condición de accesibilidad territorial urbana, el término se orienta a la accesibilidad geográfica o accesibilidad a lugares. Existen diversos métodos para la estimación de la condición de accesibilidad, los cuales se realizan mediante indicadores y varían de acuerdo a la escala de análisis, por consiguiente y de acuerdo a la literatura, la aplicación se efectúa de acuerdo a los tres niveles de accesibilidad: accesibilidad relativa que hace referencia a la relación en términos de movilidad entre dos puntos; accesibilidad absoluta que evalúa la participación de un punto respecto a varios; y accesibilidad global que estudia los vínculos y movimientos de varios puntos entre sí dentro de un territorio (Loyola Gómez, 2005), (Bautista, 2018), (Gómez, 2005).

5.1.4 CONECTIVIDAD

En el contexto del transporte para evaluar el grado de articulación de un sistema de transporte hay que analizar la distribución de flujos de la población y la interacción del territorio (Bautista, 2018), (Martínez Sánchez, 2012), evaluando accesibilidad y conectividad en conjunto. La vinculación de mercados como factor importante en la dinámica del territorio se definen por el grado de conectividad de la red de transporte; alta densidad vial, la reducción de distancias y la

concentración de espacio no define el grado de conectividad, se define mediante indicadores que expresen la estructuración de la red de transporte (Loyola Gómez, 2005).

5.1.5 ANÁLISIS ESPACIAL Y ESTADÍSTICA ESPACIAL

El análisis espacial comprende el conjunto de técnicas y procedimientos que estudia el comportamiento de la información en una configuración geométrica, topológica y geográfica (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009), (Bhat, y otros, 2000). Cualquier evento tiene una ubicación en el espacio, por ende es susceptible de modelación y análisis desde una perspectiva geográfica; las entidades que se encuentren en una dimensión espacio-temporal, ya sean estáticas o dinámicas, por naturaleza tienen características propicias de análisis espacial: su forma, ubicación, patrones de crecimiento y conectividad entre sí, son propiedades que tienen impacto en el funcionamiento del sistema de transporte (Principi, 2012).

Por medio de éste, es posible evaluar el comportamiento y conexión de las entidades incidentes en la dinámica de un territorio, representarla geográficamente permitiendo facilitar su interpretación para proveer soluciones a los problemas que se puedan presentar. En términos de accesibilidad, el análisis espacial permite caracterizar el espacio relativo a partir de los vínculos de una red, con el fin de poner en evidencia el nivel de integración espacial de cada entidad geográfica y la relación con las interacciones socioeconómicas de una población (Principi, 2012).

Por su parte la estadística espacial, es una rama matemática que estudia un conjunto de datos en determinado espacio, las relaciones, localización y su variación en el tiempo, pudiéndose enfocar en varias dimensiones de actuación; para efectos metodológicos, el uso de estadística multidimensional evalúa geográficamente los patrones de exclusión social relacionada con movilidad, mitigando un poco la complejidad en la búsqueda de las causas de esta exclusión (Jara & Carrasco, 2009). Así como en el análisis espacial e indicadores de accesibilidad, para describir

desde la perspectiva estadística el comportamiento de los viajes que definen la movilidad en un territorio, las variables que inciden en dichos movimientos son objeto de evaluación mediante regresiones y correlaciones que permitan explicar las tendencias, efectos e impactos en la calidad de vida de la población (Gómez, 2005), (Bautista, 2018), (Vivas Pacheco, 2011).

5.1.6 EXCLUSIÓN SOCIAL Y SEGREGACIÓN ESPACIAL

El concepto de exclusión social para efectos de esta investigación, está ligado intrínsecamente a los términos de movilidad y accesibilidad territorial; es un condicionante en el acceso de las personas a servicios y necesidades, donde a mayor grado de movilidad, se aleja del patrón de exclusión social (Martínez Ortega, 2012). La falta de acceso a servicios, oportunidades económicas y redes sociales debido a una movilidad reducida genera exclusión social (Kenyon , Rafferty, & Lyons, 2003). Bajo un entorno geográfico, la exclusión social relacionada con la movilidad se define como el proceso en donde la capacidad de acceso y participación de la comunidad con su entorno, se ve limitada por la oferta de movilidad en la misma, donde el sistema de transporte juega un papel vital en la calidad de vida de la comunidad, puesto que la falta de conectividad denota un nivel de pobreza en la misma (Titheridge, Achuthan, & Mackett, 2009).

5.2 MARCO TEÓRICO

Esta sección provee información referente a las técnicas y/o modelos matemáticos adoptados por los autores en la revisión bibliográfica para desarrollar sus estudios y que ofrecen un mayor grado de precisión para adaptarse al presente análisis desde los tres enfoques de análisis: infraestructura, servicio y operación y cobertura.

5.2.1 MEDIDAS TOPOLÓGICAS

En la dimensión espacial existen diferentes métodos que permiten analizar los factores geométricos que conforman la estructura de la red de transporte y su influencia en la accesibilidad

geográfica, la teoría de grafos es sin duda la más utilizada en los estudios de accesibilidad, dicha teoría simplifica la red de transporte en una geometría compuesta por nodos o puntos de conexión y arcos o trayectorias de flujo, la red se representa como una abstracción de puntos y líneas que comprenden los orígenes, destinos y vínculos del territorio, donde la configuración de nodos y arcos es el elemento principal en la interpretación de una red de transporte (Loyola Gómez, 2005), (Pacheco Gago, 2003).

La gran mayoría de autores que evalúan las condiciones de accesibilidad territorial utilizan la teoría de grafos para caracterizar la funcionalidad y estructura de la red de transportes (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009); por ejemplo (Gómez, 2005), realiza una revisión extensa de distintos modelos de transporte que varían según el enfoque, teniendo en cuenta la infraestructura, los usuarios y la circulación. La distancia real (sobre vías de comunicación) e ideal (bajo un espacio euclidiano), son los principales elementos para calcular la accesibilidad relativa entre dos o más puntos, y es posible definir el nivel de acceso según la trayectoria y capacidad de cada uno de estos indicadores (Principi, 2012).

Las medidas topológicas se basan en el uso de variables físicas para dar explicación a las configuraciones espaciales de las redes, de ahí es posible definir una serie de indicadores que permitan estructurar un método capaz de evidenciar el grado de conectividad y funcionalidad de la red en cuanto a su infraestructura.

5.2.1.1 Indicador de Kansky (Murillo Hoyos, 2007)

Es una medida topológica que tiene en cuenta la dotación de infraestructura de la red y se basa en la conexión de los nodos de la red para definir la coherencia entre la misma. Se expresa en términos de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4).

$$\beta = \frac{e}{v}, \text{ con un rango entre } 0 \leq \beta \leq \frac{v-1}{2} \quad (1)$$

Donde,

β : Betta

e: número de arcos

v: número de nodos

La anterior expresión explica que cuando una red inconexa comienza a crecer, la conexión entre nodos aumenta más rápidamente; a mayor valor, mayor complejidad tiene la red. La relación entre los nodos existentes y el máximo posible (Gamma), cuando seguramente haya necesidad de ampliación de la red se calcula mediante la expresión (2).

$$\tau = \frac{e}{3(v-2)}, \text{ con un rango entre } 0 \leq \tau \leq 1 \quad (2)$$

La cohesión máxima (Alfa), es decir la relación entre arcos existentes y el máximo posible se calcula mediante (3).

$$\alpha = \frac{e-v}{2v-5}, \text{ con un rango entre } 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (3)$$

Para calcular la coherencia mínima de la red se utiliza la expresión (4)

$$e_{min} = v - 1 \quad (4)$$

5.2.1.2 Factor de ruta – factor de ruta integral

(Moyano, Prieto, & Martínez, 2018), (Murillo Hoyos, 2007), (Ramírez Cajigas, 2018).

Este indicador se usa para definir el grado de aproximación a una línea recta entre el origen y el destino, con base en las condiciones de la ruta y así tratar de medir la calidad del trazado. Para su cálculo, es necesario construir matrices de distancias entre cada uno de los nodos (sobre la red y en línea recta). El indicador de factor de ruta y factor de ruta integral se calculan mediante las ecuaciones 5 y 6 respectivamente.

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{d^o_{ij}} \quad (5)$$

Donde,

r_{ij} : Factor de ruta entre los nodos i y j

d_{ij} : distancia mínima por la red entre los nodos i y j

d^o_{ij} : Distancia en línea recta entre los nodos

$$R_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{d_{ij}}{d^o_{ij}} \quad (6)$$

Donde,

R_i : Factor de ruta integral del nodo i

n : número de nodos

5.2.2 MEDIDAS DESAGREGADAS

Las medidas desagregadas tienen en cuenta trayectos individuales por la red, obviando características propias de los nodos atractores y emisores de viajes (Monsalve Téllez & Piedrahita Quintero, 2017), estos indicadores no incluyen variables sociales que puedan incidir en el comportamiento de los viajes, como por ejemplo: el tiempo global sobre la red, la accesibilidad real e ideal, densidad de red, índice de trazado y velocidad, entre otras. Este tipo de estimaciones, complementadas con las medidas agregadas proveen información de la capacidad de servicio de las redes de transporte de acuerdo a sus parámetros operativos de cada modo y su conexión con la infraestructura disponible. A continuación, se detallan las medidas desagregadas más idóneas para ser aplicadas en el desarrollo de esta investigación, de acuerdo con la literatura revisada.

5.2.2.1 Indicador de densidad

(Lerma, 2017), (Huertas Rodríguez & Serrano Florez, 2017)

Esta medida desagregada permite evaluar la infraestructura de transporte respecto a un área determinada, puede tener variedad de estimaciones de acuerdo a su ponderación y se calcula mediante las ecuaciones 7 (general) y 8 (ponderada).

$$D = \frac{\text{Longitud de red (km)}}{\text{Área de estudio (km}^2\text{)}} \quad (7)$$

Para este estudio, se agregó una ponderación a la expresión, la cual se expresa en la ecuación 8.

$$D = \frac{\text{Long.de red (km)} * \text{Factor pond.ruta} * (\text{Factor pond.capac.} + \text{No.paradas})}{\text{Área de estudio (km}^2\text{)}} \quad (8)$$

5.2.2.2 Índice de trazado – velocidad

(Murillo Hoyos, 2007), (Lerma, 2017), (Ramírez Cajigas, 2018)

Este indicador permite evaluar la capacidad operacional de las rutas de transporte público en una red teniendo en cuenta las distancias entre los nodos y los tiempos recorridos. Se calcula mediante las expresiones 9 y 10.

$$Itv_{ij} = \frac{t_{ij}}{t_{ij}^0} \quad (9)$$

Donde,

Itv_{ij} : Indicador de trazado – velocidad entre los nodos i y j

t_{ij} : Tiempo mínimo de recorrido entre i y j usando la red

t_{ij}^0 : Tiempo ficticio en línea recta a la velocidad media entre los nodos i y j

Entonces el indicador quedaría según la expresión número (10)

$$Itv_i = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{j=1}^{j=n} t_{ij}}{\sum_{j=1}^{j=n} t_{ij}^0} \quad (10)$$

Donde,

Itv_i : Índice de trazado – velocidad en el nodo i

n: número de nodos

5.2.3 MEDIDAS AGREGADAS

Las medidas agregadas evalúan la interacción de movimientos de la red con el territorio dependiendo de su uso del suelo, generalmente estos modelos tienen una variable social; dentro de estos indicadores podemos encontrar el IPTP (Índice de provisión del transporte público), Gravedad, Indicador de Hansen, entre otros, usados por una amplia gama de autores, así mismo,

el análisis de movimientos con modelos gravitacionales (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2006), (Achuthan, Titheridge, & Macket, 2010), (Geurs & Van Wee, 2004), (Bhat, y otros, 2000), (Jara & Carrasco, 2009), (Pacheco Gago, 2003); son abstracciones que permiten calcular un potencial de atracción de los nodos, basados en las distancias y los recursos invertidos en su trayecto, efectivos a la hora de definir el grado de accesibilidad a los nodos, el cual estima el potencial de oportunidades un una zona i a las demás zonas n , donde las oportunidades en menor valor o más distantes proveen influencias decrecientes.

5.2.3.1 Índice de provisión de transporte público (IPTP)

(Jurado Barco & Tovar Mambuscay, 2016), (Jaramillo et al., 2012), (Huertas & Serrano, 2017)

Este indicador permite dimensionar la accesibilidad al sistema de transporte público desde un enfoque topológico, los parámetros que usa son estrictamente del sistema (frecuencias, paradas, capacidad), por tal motivo permite precisar la información resultante con variables propias de la zona de estudio. El IPTP cuantifica la oferta de transporte en determinada zona teniendo en cuenta la población de las mismas, lo cual permite inferir en la equidad de la oferta del transporte. El indicador se calcula mediante las ecuaciones (11), (12) y (13).

$$A - IPTP_j = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n s_{ij} w_{ci} w_{fi} \quad (11)$$

Donde,

$IPTP_j$: Índice de provisión de transporte público en la zona j

n : número de modos y/o servicios de transporte público disponible

s_{ij} : Número de paradas para el modo i en la zona j

w_{ci} : Factor de ponderación por capacidad del modo i

w_{fi} : Factor de ponderación por frecuencia del modo i

A : área de la zona j

Para el cálculo de los factores de ponderación,

$$w_{ci} = \frac{c_i}{c_{min}} \quad (12)$$

Donde,

c_i : Capacidad del vehículo del modo i

c_{min} : Capacidad del vehículo más pequeño entre los modos disponibles

$$w_{fi} = \frac{f_i}{f_{min}} \quad (13)$$

Donde,

f_i : Frecuencia para el modo i

f_{min} : Frecuencia más baja entre los modos disponibles

5.2.3.2 Indicador de gravedad

(Murillo Hoyos, 2007)

El indicador de gravedad es una medida agregada que proporciona información conjunta de los nodos de la red, incluyendo una variable de tipo social y un valor de impedancia; este indicador caracteriza los nodos con mejores condiciones de accesibilidad con base en el costo que genera la población al desplazarse desde un punto i a un punto j . Existen muchas apreciaciones de esta medida, sin embargo, para el cálculo del indicador en esta investigación se realiza mediante la ecuación 14.

$$a_{ij} = \frac{P_j}{e^{\beta d_{ij}}}, \forall i \neq j \quad (14)$$

Donde,

P_j = Población del nodo destino

β = Impedancia entre i y j

d_{ij} = distancia en km entre i y j

5.2.3.3 Índice de accesibilidad

(GIRÃO, Pereira, & Fernandes, 2017)

Esta medida integral permite evaluar la accesibilidad de una zona específica teniendo en cuenta variables operativas de los modos que inciden en su movilidad, variables físicas y una variable socio-económica, con el fin de analizar la adecuación de la red con base a su infraestructura, la población beneficiada y la configuración del territorio. Este indicador se compone por tres indicadores y se detallan mediante las expresiones 15-19.

$$I_1 = \sum_{i=1}^k \left(\frac{A_{cob}}{A_{tot}} \times w_m \right) \quad (15)$$

Donde,

I_1 : Indicador 1

A_{cob} : Área cubierta por cada modo

A_{tot} : Área total de la zona de estudio

w_m : Factor de peso para cada modo

k: número de modos

El indicador número 1 realiza la sumatoria de la relación de cobertura geográfica por cada modo, multiplicado por un factor de peso. El segundo indicador estima la conectividad de la red mediante los puntos de acceso, su cálculo se realiza con la ecuación 16.

$$I_2 = \sum_{i=1}^k (N_{d_m} \times w_m) \quad (16)$$

Donde,

I_2 : Indicador 2

N_{d_m} : Número de destinos accesibles por modo de acuerdo a una localización específica

w_m : Factor de peso para cada modo

k: número de modos

El tercer indicador evalúa la conectividad de la red a puntos accesibles y disponibles dentro de un área específica, se calcula mediante la ecuación 17.

$$I_3 = \sum_{i=1}^k (N_{e_m} \times w_m) \quad (17)$$

Donde,

I_{32} : Indicador 3

N_{d_m} : Número de trabajos accesibles por cada modo

w_m : Factor de peso para cada modo

k: número de modos

Para la estimación de pesos por cada modo, se utilizan variables operativas por cada uno, se calcula mediante una sencilla fórmula en la expresión 18.

$$W_{msi} = \left(\frac{C_m}{C_{max}} + \frac{V_m}{V_{max}} \right) / 2 \quad (18)$$

Donde

W_{msi} : Factor de peso por cada modo

C_m : Capacidad del vehículo por cada modo

C_{max} : Capacidad máxima de los modos

V_m : Velocidad media de operación sobre un tramo

V_{max} : Velocidad máxima de operación según los modos

Teniendo en cuenta que el primer indicador hace referencia a la accesibilidad a la infraestructura de los sistemas, y los otros dos a la accesibilidad a los destinos; para la asignación de pesos se parte de la premisa de que ambos ámbitos tienen igual relevancia, por tal motivo su ponderación se desglosa en dos partes iguales, de las cuales el factor de peso para el indicador número 1 queda completo y para los otros indicadores se subdivide. De esta forma, la composición del índice con los factores de peso queda expresado mediante la ecuación 19.

$$IA = (I_1 * 0,5) + (I_2 * 0,25) + (I_3 * 0,25) \quad (19)$$

5.2.4 MEDIDAS COMPLEMENTARIAS Y VALIDACIÓN

Para el análisis de accesibilidad desde el enfoque de cobertura se hace uso de herramientas de sistemas de información geográfica como el análisis de redes, el cual ofrece un panorama

manifiesto del costo que implica movilizarse por los tramos de la red del sistema, a esto se le conoce como impedancias en los trayectos, para cada modo y los recorridos peatonales (Achuthan, Titheridge, & Macket, 2010), (Escobar & García, 2011), (Escobar, Tapasco, & Giraldo, 2015); estos factores afectan los resultados de los modelos de accesibilidad aplicados e infieres en los tiempos de la cadena de viaje. En consecuencia, el análisis de redes permite definir áreas de servicio de cada sistema de transporte con el fin de cuantificar la población cubierta por cada sistema.

5.2.4.1 Normalización

(GIRÃO, Pereira, & Fernandes, 2017), (Gómez, 2005).

El análisis estadístico es un referente importante en el comportamiento de las variables que inciden en el patrón de movilidad (Dávila , 2013), (Bhat, y otros, 2000), por consiguiente, es necesario aplicar métodos matemáticos que permitan armonizar los valores en una escala comparable. En la expresión 20 se expone la ecuación para normalizar los datos resultantes en los indicadores, con el fin de llevarlos a la misma escala y que permitan ser comparados entre sí por las medidas de correlación.

$$X_{norm} = \frac{(X - X_{min})}{(X_{max} - X_{min})} \quad (20)$$

Donde,

X_{norm} : Valor normalizado

X : Valor calculado

X_{min} : Valor mínimo del conjunto de datos

X_{max} : Valor máximo del conjunto de datos

5.2.4.2 Coeficiente de correlación de Pearson

(Lerma, 2017), (Monsalve Téllez & Piedrahita Quintero, 2017).

Para explicar el comportamiento y correspondencia lineal entre los indicadores y algunas variables, y de este modo, detallar las relaciones entre la participación del individuo con su entorno, se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson calculado mediante la ecuación 21.

$$r_{X,Y} = \frac{\sum XY}{\sqrt{(\sum X^2)(\sum Y^2)}} \quad (21)$$

Este valor varía entre -1 y 1, si es igual a 1 existe una auto correlación positiva perfecta, existe concentración y dependencia; si es igual a 0 no existe correlación, son datos aleatorios; y si el coeficiente es igual a -1 existe auto correlación negativa perfecta, existe dispersión de los datos y no existe dependencia entre ellas.

5.2.4.3 *Índice de Morán* (Vivas Pacheco, 2011)

El Índice de Morán en este estudio se utilizó para evaluar la distribución espacial de los valores de accesibilidad y definir si los datos muestran patrones de segregación o aleatoriedad.

5.3 MARCO REFERENCIAL

En la medición de accesibilidad geográfica de un sistema de transporte, existen muchos métodos que permiten evidenciar la capacidad operacional, la conectividad, la cobertura y la infraestructura de la misma para definir el desempeño y, por tanto, cuál es su impacto en la movilidad (Rodrigue, Comtois, & Slack, 2006). Como lo expresa (Amézquita, Durán, & Fajardo, 2016) la calidad de los medios de transporte ofrecidos como alternativa de desplazamiento en el contexto urbano, influye directamente en el disfrute y acceso a los servicios por parte de la población. Por consiguiente, el grado de conexión como medida de calidad de una red de transporte puede estimarse con medidas como el indicador de densidad de Kansky, usado por (Murillo Hoyos, 2007) y (Bautista, 2018), es una medida netamente topológica que evalúa la capacidad de conexiones de la red mediante parámetros para definir el grado de complejidad de la red según su

configuración espacial, y poder estimar la accesibilidad desde y hacia los nodos, sin tener en cuenta distancias ni la geografía de la zona.

Para evaluar la calidad de los recorridos de los modos se utilizan medidas como el índice de trazado y velocidad usado por (Ramírez Cajigas, 2018), (Murillo Hoyos, 2007), (Monsalve Téllez & Piedrahita Quintero, 2017) y (Lerma, 2017), el cual permite evaluar la eficacia del sistema de transporte con respecto a sus trazados sobre la red representada mediante curvas de tiempos de recorrido, a mayor medida, menor calidad de la red; esta medida provee valor importante a la hora de hacer análisis de pérdida y ganancia de tiempo. El Factor de Ruta permite evaluar la calidad de la red de transporte y se representa mediante una matriz de distancias entre los nodos, autores como (Murillo Hoyos, 2007), (Pacheco Gago, 2003), (Ramírez Cajigas, 2018) evaluaron la eficiencia de las redes mediante su configuración topológica.

El Índice de provisión de transporte público (IPTP) es una medida que ha sido ampliamente utilizada en la evaluación integral de accesibilidad en zonas donde confluyen diversos modos de transporte público por autores como (Bravo Serna & Hurtado Urrea, 2016), (Jurado Barco & Tovar Mambuscay, 2016), (Jaramillo, Lizárraga, & Grindlay, 2012). Por su parte, (GIRÃO, Pereira, & Fernandes, 2017), proponen un índice de accesibilidad que integra todos los modos de transporte de una zona de estudio evaluando la calidad de servicio y operación con respecto a las variables sociales del entorno, con el fin de evaluar la efectividad de los modos que confluyen en un área determinada desde una perspectiva geoespacial; este índice propicia buenos resultados de caracterización de oferta de transporte en una zona al tener en cuenta diversos aspectos influyentes en la movilidad urbana.

Los sistemas de transporte por cable (STC), son una alternativa que ha tomado fuerza como medio de transporte público en la última década, especialmente en zonas donde el crecimiento

acelerado y desordenado imponen barreras a la movilidad y participación de la comunidad en bienes y servicios. En Latinoamérica se ha incrementado la ocupación de espacios en la periferia y zonas de ladera para cubrir la necesidad habitacional a falta de una planeación adecuada (CAF & AFD, 2018); ciudades como Medellín, Manizales, Caracas, Río de Janeiro, La Paz y por supuesto Santiago de Cali han implementado sistemas de transporte por cable para suplir la necesidad de movilidad hacia zonas metropolitanas e integrarlas con otros modos de transporte para garantizar el acceso y participación efectiva de la comunidad. Todos los sistemas anteriores son similares en su objetivo, pero presentan diferencias unos con otros respecto a la integración con modos, su estructura técnica y el impacto generado en la comunidad; por ejemplo en Río de Janeiro pretende generar un impacto social positivo en el grupo de favelas ‘do alemão’ conectando esta población con la red ferroviaria de la ciudad; mientras que en Caracas funciona una línea expresa de trayecto corto con solo dos estaciones de embarque y salida para conectar con la línea del metro, ayudando a descongestionar la única vía de entrada y salida de la zona montañosa. Así mismo con la capacidad de movimiento de pasajeros, por ejemplo, los sistemas de Caracas y Manizales movilizan una carga máxima de 2000 y 2100 pasajeros por hora, mientras que los otros sistemas tienen la capacidad máxima de transportar hasta 3000 pasajeros / hora (CAF & AFD, 2018).

El Metrocable de Medellín ha sido ampliamente estudiado desde enfoques como el de accesibilidad urbana, económico y de impacto social por autores como (Bocarejo & Velásquez, 2012), (Brand & Dávila, 2011), (Heinrichs & Bernet, 2014), (Zapata Córdoba, Stanley, & Stanley, 2014). Por otro lado, se ha evaluado el impacto de los sistemas de transporte por cable en ciudades como Bogotá, Pereira y Manizales por autores como (Bernier, 2014), (Escobar & García, 2011), (Escobar, Tamayo, & Holguín, 2016), (Velásquez Villada, 2018), concluyendo que, si bien los

sistemas de transporte por cable mejoran los tiempos de viaje en zonas de difícil acceso, el impacto socioeconómico generado por estos sistemas requiere un detalle minucioso de las dinámicas del mercado de cada sector, con el fin de inferir en el costo-beneficio de la implementación del sistema de transporte en la población.

En la ciudad de Santiago de Cali, a la fecha de este estudio aún no se ha realizado una investigación del impacto en términos de movilidad y su relación con la participación de la población en las actividades, bienes y servicios de la implementación del MIO CABLE; sin embargo el STM MIO si ha sido ampliamente estudiado por autores como (Banco Interamericano de Desarrollo, 2016), (Bravo Serna & Hurtado Urrea, 2016), (Carvajal, 2016), (Huertas Rodríguez & Serrano Florez , 2017), (Jurado Barco & Tovar Mambuscay, 2016), (Jaramillo, Lizárraga, & Grindlay , 2012); los cuales evalúan el desempeño del bus de tránsito rápido (BRT) en la movilidad de distintas zonas de la ciudad, midiendo los niveles de accesibilidad y la relación con variables sociales de la Ciudad. Por su parte (Lerma, 2017) y (Villar, 2017) evalúan los sistemas de transporte público tipo campero, que es muy utilizado en algunas partes de la ciudad como alternativa que suple la demanda de viajes generada por la población residente en las zonas de ladera. Los estudios mencionados anteriormente fueron utilizados como base metodológica para el desarrollo de esta investigación.

6. METODOLOGÍA

Para abordar la metodología que permita evaluar el impacto de la implementación del MIO CABLE en términos de accesibilidad territorial, es preciso realizar una descripción cualitativa y cuantitativa del área de estudio en el presente ítem con el fin de detallar las variables incidentes en la dinámica territorial en el contexto de la movilidad. Posteriormente, se estructuran cuatro fases de desarrollo para abordar el propósito planteado en esta investigación.

ÁREA DE ESTUDIO

El sistema de transporte aerosuspendido MIO CABLE beneficia directamente a la población de la Comuna 20, la cual se encuentra ubicada al Occidente de la zona urbana de Santiago de Cali, en el pie de montaña de la cordillera occidental. Limita al Norte con el Corregimiento de Los Andes y la Comuna 19, al Oriente y al Sur con la Comuna 19 y al Occidente con el Corregimiento de Los Andes. Tiene una superficie de 243,9 Has. Cubriendo el 2% del área del Municipio, cuenta con 8 barrios, 3 sectores y 478 manzanas (Plan de Desarrollo 2012-2015 Comuna 20., 2012). La topografía de la zona es abrupta, al estar situada en el pie de montaña tiene una configuración de relieve escarpado, donde las pendientes de terreno en algunos tramos superan el 100%; por tal motivo, en algunos accesos solo se puede acceder mediante escaleras o vías no vehiculares.

La Comuna 20 tiene una de las tasas de densidad de construcción más altas de la ciudad, la falta de planificación territorial, el crecimiento demográfico, el bajo costo de vida y la expansión de construcciones descontrolada aumento exponencialmente la densidad de viviendas, que se ha incrementado en modalidad de construcciones en altura debido a la poca área disponible, la configuración vial y la topografía de la zona. En términos socioeconómicos, La Comuna 20 cuenta con un total de población de 70728 habitantes para el año 2019 (CALI EN CIFRAS 2017, 2018), 19069 viviendas para ese mismo año y el estrato moda es 1. Así mismo, pese a las condiciones topográficas y dificultad de acceso en algunas zonas de ladera alta, la Comuna cuenta con un alto índice de infraestructura vial, según (Plan de Desarrollo 2012-2015 Comuna 20., 2012), existen 41,6 Km lineales de vías, de las cuales el 5,7% están sin pavimentar. Al año 2016 según (Alcaldía de Santiago de Cali, 2016) el deterioro de la malla vial asciende la cifra por pavimentar a un 7%

del total de la malla vial. En la Tabla 1 se aprecian los datos estadísticos más relevantes de la comuna

Tabla 1. Estadísticas generales Comuna 20

<i>VARIABLE</i>	<i>FORMATO</i>	<i>2014</i>	<i>2018</i>
ÁREA	HAS.	243,9	243,9
POBLACIÓN	HAB.	68980	70375
MANZANAS	UNIDAD	478	516
BARRIOS	UNIDAD	8	8
SECTORES	UNIDAD	3	2
VIVIENDAS	UNIDAD	17841	18827
ESTRATO MODA	CIFRA	1	1
HOGARES/VIVIENDA	CIFRA	1,1	-
DENSIDAD DE CONSTRUCCIÓN.	VIV. /HA.	73,1	77,2
DENSIDAD DEMOGRÁFICA	HAB. /HA.	283	289

Fuente: Elaboración propia a partir de (Alcaldía de Santiago de Cali, años: 2012, 2014, 2016, 2018)

En el área de estudio intervienen distintos modos de transporte público como los vehículos tipo campero o también llamados popularmente como ‘gualas’, son vehículos adaptados mecánicamente para transitar con carga de pasajeros u objetos por zonas con fuertes pendientes, donde los buses tradicionales de servicio público no acceden debido al alto nivel de exigencia topográfica. En la parte baja de la comuna operan las rutas del bus complementario tipo alimentador del STM MIO, de color verde, tiene una capacidad de 60 pasajeros y permite el abordaje y descenso de pasajeros en zonas donde la infraestructura de troncales y pretroncales no puede acceder, generalmente en vías locales, residenciales y colectoras. Las rutas que tienen área de influencia en la zona de estudio confluyen en la terminal Cañaveralejo, que a su vez se conecta con la estación Unidad Deportiva para la repartición de viajes hacia distintos puntos de la ciudad. Así mismo, el sistema de transporte por cable (STC) MIO CABLE, conecta con la terminal Cañaveralejo. En la figura 1 se aprecia geográficamente la zona de estudio y la red vial general.

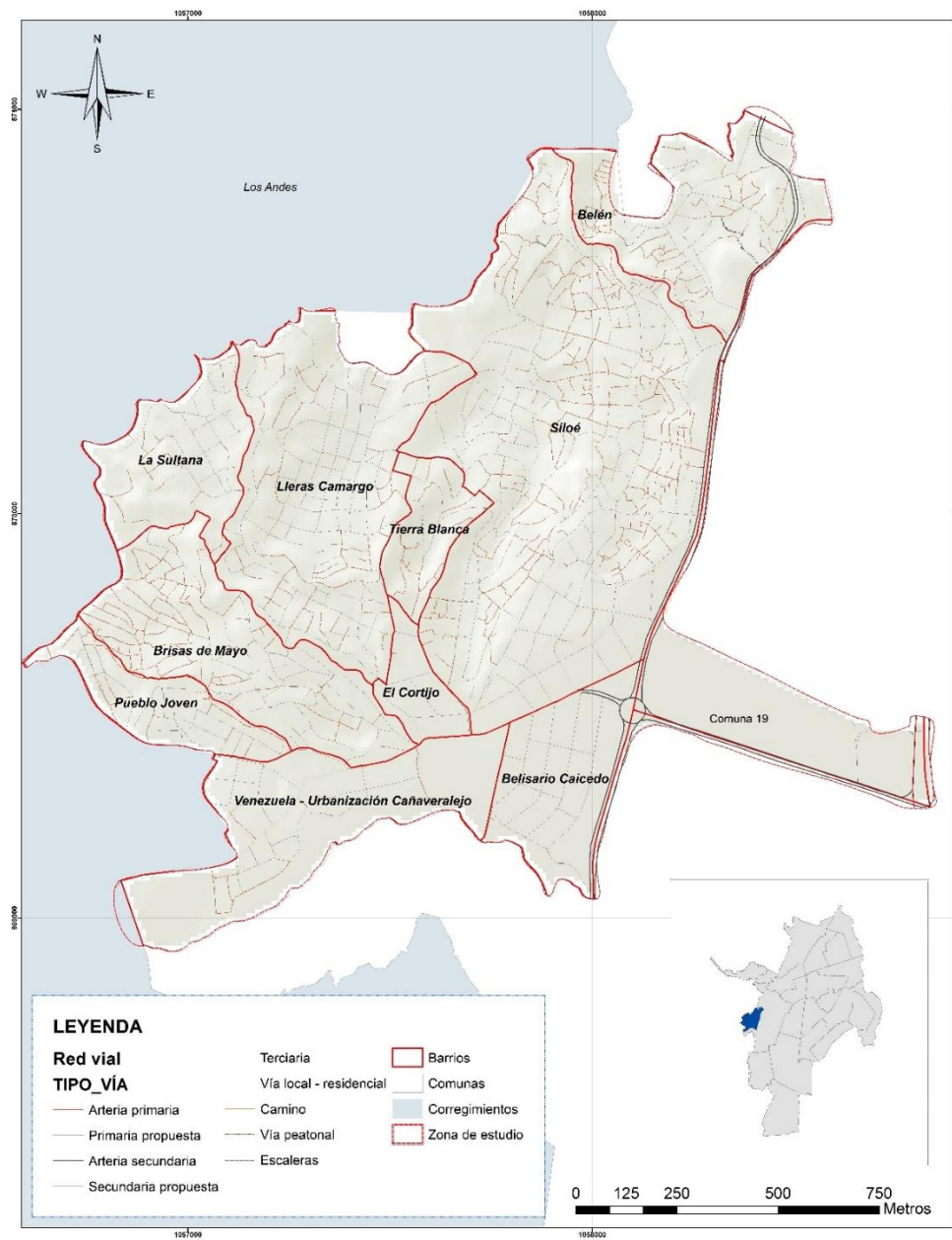


Figura 1. Zona de estudio

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Para darle cumplimiento a los objetivos planteados en esta investigación se establecieron cuatro fases de desarrollo que corresponden al desarrollo de cada uno de ellos, a continuación, en la figura 2, se presenta la forma en la cual se abordó el análisis expuesto, describiendo cada proceso llevado a cabo en cada etapa.

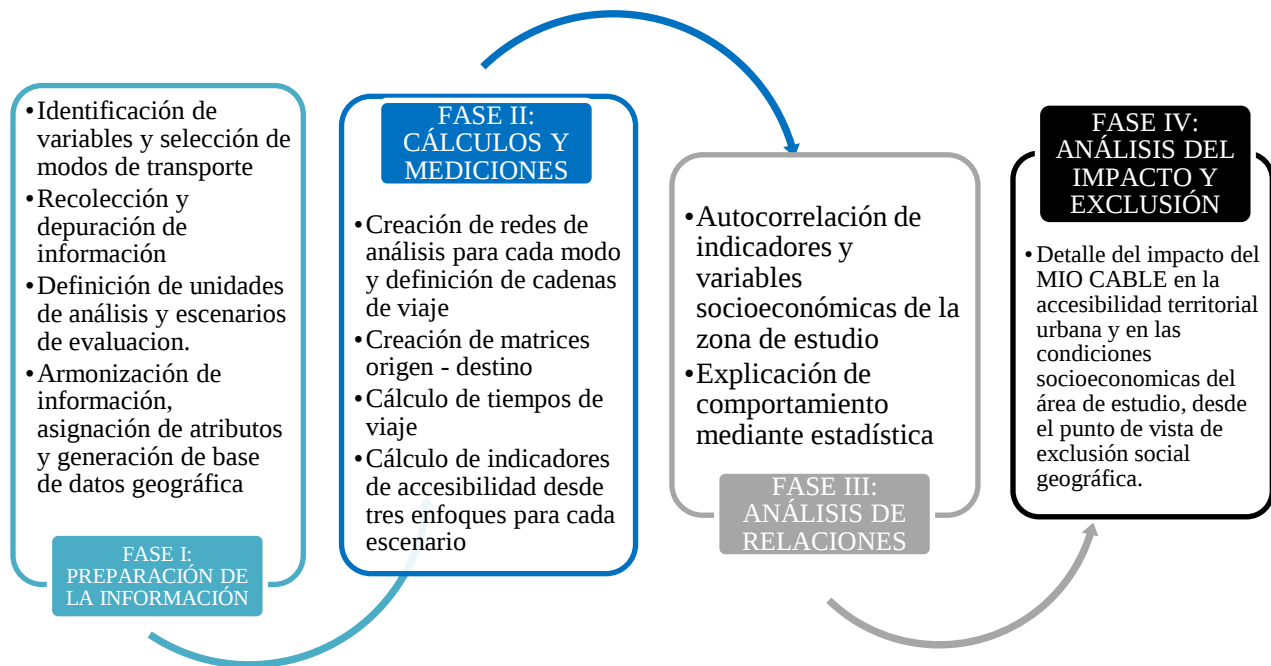


Figura 2. Flujograma metodológico

Fuente: Elaboración propia, 2019.

6.1 FASE I: PREPARACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La disponibilidad de la información es un factor determinante en cualquier investigación, de ella depende la calidad de los datos resultantes. La primera fase contiene los procedimientos previos que conllevan a estructurar la base metodológica; a continuación, se describen cada una de los procesos que hacen referencia a la producción y ordenamiento de la información necesaria para ejecutar los cálculos, así como también la definición de unidades de análisis y escenarios de evaluación de la presente investigación.

6.1.1 RECOLECCIÓN Y DEPURACIÓN

Para el desarrollo de esta investigación fue necesario contar con información de primer y segundo orden que garantice la calidad y fiabilidad de los productos generados; la información de orden primario para los tres modos de transporte público que operan en la Comuna fueron obtenidos de distintas fuentes de entidades competentes en el ordenamiento territorial y planeación del transporte de la ciudad, como Metrocali y los operadores de los diferentes modos de transporte que operan en la Comuna. Además, hubo recolección propia de algunos datos, como una encuesta de percepción ciudadana y registros fotográficos. Las encuestas de percepción se realizaron mediante la herramienta de Google Drive, diseñadas únicamente para apoyar el análisis de exclusión teniendo como base el criterio de las personas que viven en la Comuna y para obtener precisión en la evaluación del impacto en cuanto al uso de los modos de transporte, ya que en la Encuesta de Metrocali se realizó en el periodo 2014-2015 y la implementación del MIO CABLE fue en el año 2016. El formato de esta encuesta se encuentra en el Anexo 1.

Las entidades cartográficas para la elaboración de la base de datos fueron descargadas de los datos disponibles en web tanto como en el geovisor de la infraestructura de datos espaciales de Santiago de Cali (IDESC), el servidor de Open Street Maps (OSM) y la página de la administración municipal para la Geodatabase de los archivos Shapefile del Municipio según el POT; así mismo, se descargó toda la información socioeconómica de la Comuna y datos de población desglosada por barrio, de acuerdo con las proyecciones realizadas por el DANE. Es necesario anotar que de la información demográfica disponible en la web solo se encontró un desglose demográfico por barrio para el año 2012, lo cual genera imprecisión para los escenarios de análisis planteados; por tal motivo se realizó una solicitud de información al Departamento administrativo de planeación municipal (DAPM), de los datos proyectados por barrio según el DANE al 2014 y 2019. La

información anterior se utilizó para estimar la población de cada manzana, ponderando el área de cada una respecto a la suma total para cada barrio, de este modo asignar una población total y población potencial, la cual también fue estimada teniendo en cuenta la pirámide poblacional según las proyecciones del DAPM, de edades entre 5 y 65 años como posibles usuarios del sistema; esta información de estimación poblacional por manzana permitió a su vez asignarle el atributo demográfico a cada ZAT sumando la población de las manzanas por unidad de análisis.

En la preparación de información se realizó una actualización de la digitalización de zonas pobladas dentro de la Comuna para el año 2018 con base en la imagen satelital base del Software GIS; así mismo, se incluyeron dos manzanas pertenecientes al Barrio El Lido de la Comuna 19, que hacen parte del corredor del STM hasta la terminal Cañaveralejo para conformar la totalidad de unidades mínimas a analizar en la zona de estudio. De igual forma, se evidenció que la capa de red vial contenida en la información de la IDESC y POT, omitía muchos tramos específicamente peatonales, por tanto, se exportaron los tramos desde el servidor de mapas de Open Street Maps (OSM); estas capas fueron complementadas con atributos físicos faltantes como nomenclatura y jerarquización para algunos tramos de la red vial, y atributos socioeconómicos como el estrato moda según cada lado de manzana, el barrio y el área.

En la tabla 2 se describen cada una de las variables obtenidas en el proceso de recolección de información con sus anotaciones, que se detallan en las etapas posteriores para refinar los datos y filtrar de acuerdo a la necesidad de cada objetivo, se armonizó el sistema de referencia para las capas geográficas y se digitalizó la información colectada en campo, con el propósito de crear las bases de datos como insumo principal en el cálculo de los indicadores de accesibilidad y análisis correspondientes.

Tabla 2. Descripción de información colectada

VARIABLE / INFORMACIÓN	TIPO	ÁMBITO	FORMATO	AÑO	FUENTE	OBSERVACIÓN
RED VIAL	Vectorial	Físico	Shapefile	2018	Open Street Maps (OSM)	Fue necesario la digitalización mediante OSM debido a la carencia de tramos en algunas zonas
CARTOGRAFÍA BASE	Vectorial	Físico	Shapefile	2014	Geodatabase POT 2014, IDESC	Manzanas, límites políticos, curvas de nivel. Fue necesario actualizar la capa de manzanas
ESTADÍSTICAS POR COMUNA	Alfanumérico	Socioeconómico	Cifras	2014-2018	DAPM	Se utilizó para realizar un análisis exploratorio
ESTRATO POR LADO DE MANZANA	Vectorial	Económico	Shapefile	2014	Departamento Administrativo de Planeación (DAPM)	A cada manzana se le asignó el estrato de acuerdo a la moda de cada uno de los lados
DEMOGRAFÍA	Alfanumérica	Social	Cifras	2014-2019	DAPM, DANE	Se realizaron proyecciones de población por barrio con base a las tasas de crecimiento del año disponible (2012)
ÁREAS DE ACTIVIDAD ECONÓMICA	Vectorial	Económico	Shapefile	2014	Geodatabase POT 2014	Se utilizó como criterio en la definición de ZAT's
VIAJES ORIGEN – DESTINO	Alfanumérica	Social – Operacional	Datos	2015	Metrocali, Steer Davies Gleavie	Los datos de la Encuesta basada en hogares de Metrocali fueron usados para el cálculo de indicadores
RUTAS CAMPERO	Vectorial – Alfanumérica	Operacional	Kml, Cifras	2014-2019	Grupo Vial S.A.S., Propia	Fue necesario coleccionar información en campo para el año en curso del trazado de rutas y variables operacionales
RUTAS ALIMENTADORAS	Vectorial – Alfanumérica	Operacional	Kml, Cifras	2017	Metrocali	La información aportada se usó en ambos escenarios
MIO CABLE	Vectorial – Alfanumérica	Operacional	Shapefile, Cifras	2017	Metrocali, OSM	La ubicación de las estaciones se definió con base a las capas obtenidas por OSM

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La obtención de algunos datos geográficos y alfanuméricos necesarios para los análisis de las redes de transporte se vio limitada debido a la falta de correspondencia de algunas entidades; por consiguiente, surgió la necesidad de coleccionar en campo información concerniente a los parámetros operativos de la red de camperos como: trayectos, paradas teóricas, capacidad operacional, velocidad promedio de recorrido, entre otras variables. Los datos fueron tomados

mediante una aplicación instalada en el teléfono llamada ‘Geo Tracker’, la aplicación es idónea con respecto a otras aplicaciones debido a la gran cantidad de parámetros que se obtienen al grabar los recorridos, además puede funcionar solamente con la señal GPS, evitando interrupciones cuando el teléfono se queda sin señal.

Se tomaron datos de los recorridos de seis rutas que inciden en el área de estudio desde el inicio hasta el final, tiempos de viaje promedio, velocidad mínima, promedio de recorrido y máxima, tiempos de espera y pendientes aproximadas de los tramos; así mismo, para la red de camperos se definieron puntos estratégicos en la zona con una cantidad mayor de afluencia de pasajeros como pseudo-paradas, estos puntos fueron georreferenciados mediante la aplicación. La información fue recolectada en dos salidas a campo: un día hábil en horas de la mañana y un sábado en horas de la tarde, lo anterior no evidenció cambios significativos en los tiempos de viaje, lo cual permitió promediar los parámetros operacionales para una sola toma. En la figura 3 se muestran algunos datos obtenidos mediante la aplicación ‘Geo Tracker’ para seis rutas de la red de camperos que operan en la zona de estudio.

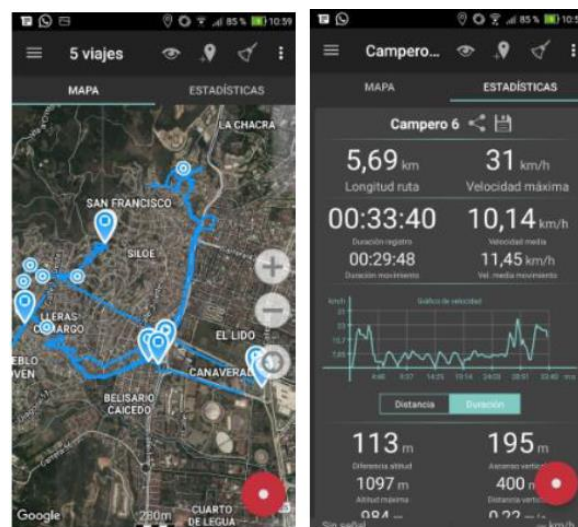


Figura 3. Datos colectados mediante aplicación Geo Tracker

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La información colectada se complementó con datos aportados por los transportadores y despachadores de sectores como La Sirena y El Palo, brindando información como: la frecuencia por día, capacidad de vehículos, horarios, rutas, entre otros. Una vez obtenidas las redes viales con atributos físicos de los sistemas de transporte tipo campero, alimentador, trayectorias peatonales se realizó una explotación de las capas por cada tramo, definiendo su inicio y fin en cada intersección vial, con el objetivo de tener velocidades para cada uno y poder generar una red con distintas opciones de recorrido.

Posteriormente, se hizo uso de las curvas de nivel cada cinco metros en la zona de estudio para crear un modelo digital de elevaciones (DEM) mediante las herramientas de análisis del Software ArcGIS, donde primero se realizó una triangulación por una superficie irregular en triángulos (TIN) para luego convertirlo a un modelo Raster con tamaño de pixel de diez metros.

Una vez obtenido el DEM, se procede a generar mediante el Software GIS un mapa de pendientes de acuerdo a una clasificación de elevaciones con respecto a las distancias entre celdas; este mapa fue reclasificado en cinco categorías según el porcentaje de pendiente, las cuales se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Reclasificación de mapa de pendientes

<i>CATEGORÍA</i>	<i>CELDA</i>	<i>RANGO</i>
1	4899	0-3%
2	2752	3-12%
3	4803	12-25%
4	7740	25-50%
5	2174	>50%

Fuente: Elaboración propia, 2019

El mapa de pendientes reclasificado, se procede a asignarle un atributo de elevación a la capa de red vial para cada tramo con el objetivo de ponderar la velocidad sobre el mismo de acuerdo a la fricción que genera el desplazamiento por pendientes; se realiza mediante una

herramienta de análisis espacial del Software ArcGIS que permite asociar cada tramo de la red vial depurada con la pendiente de cada celda del Raster generado, para cada tramo se pueden asignar valores de elevación mínima, máxima y promedio, la cual fue la designada para el atributo.

Al obtener la capa de red vial depurada por tramos en cada intersección con su valor promedio de pendiente se procede a generar las capas de redes de transporte a evaluar, para ello se cargaron los archivos Kml de las rutas campero de 2014 y el alimentador del MIO proporcionadas por las entidades correspondientes, se asocian los recorridos con los tramos concordantes para exportar los tramos viales que son usados por cada modo de transporte en el primer escenario. Para el segundo escenario, la capa de alimentadores del MIO no obtuvo ningún cambio, solo se complementó con la red de MIO CABLE al permitir la integración sin recargo monetario al STM en la terminal; en contraste, para la red actualizada de camperos se utilizaron los datos colectados en campo mediante la aplicación para la exportación de los tramos y asignación de valores de pendiente.

El mismo procedimiento se aplicó para generar la red peatonal, la cual consiste en todos los tramos viales del área de estudio, asumiendo que el peatón puede recorrerlos en sus trayectorias origen – destino. Las paradas del STM aportadas por Metrocali fueron digitalizadas de acuerdo a su dirección y se categorizaron según el número de rutas que reciben, además se incluyeron rutas y paradas del sistema que pasan por la zona de estudio, pero no tienen el terminal Cañaveralejo como punto de origen; para los camperos fueron digitalizadas y categorizadas, las paradas según los datos colectados en campo.

Al ponderar las velocidades de cada sistema, se asignaron los atributos a cada una de las redes creadas para calcular la impedancia en minutos por cada tramo, teniendo en cuenta la velocidad y la longitud de los mismos.

Estimación de impedancias

En el análisis de redes, la impedancia o el costo de desplazamiento es el eje de análisis de los movimientos, puede hacerse por distancia o por tiempo, para esta investigación se optó por enfocar los análisis de impedancia respecto al tiempo en minutos, debido a configuración topográfica de la zona, donde la pendiente es un factor determinante en los recorridos. Teniendo como base los parámetros operacionales de cada red de transporte objeto de análisis que se mueve sobre la superficie vial en el presente estudio, se procede a ponderar la velocidad promedio de recorrido de cada modo por el valor de pendiente promedio generado en el ítem anterior. Cabe precisar que, para la red peatonal, de acuerdo con (Carey citado por Santuario Torres, 2016), se asignó una velocidad máxima de 4.5 km/h en zonas planas sin obstáculos para el peatón.

En la tabla 4 se resumen los pesos o ponderaciones de la velocidad promedio de cada modo respecto a la pendiente de los tramos.

Tabla 4. Ponderación de velocidades según pendientes

<i>Pendiente (%)</i>	<i>Velocidad promedio recorrido Camperos (Km/h)</i>	<i>Velocidad promedio recorrido alimentador (Km/h)</i>	<i>Velocidad promedio trayectoria peatonal (Km/h)</i>
0 – 5	16,75	17,85	4,5
5,1 – 15	15	15	4
15,1 – 30	12,6	15	3,5
30,1 – 50	11,2	12,5	3
50 >	10,15	12,5	2,5 – 2

Fuente: Elaboración propia, 2019.

6.1.2 UNIDADES DE ANÁLISIS Y ESCENARIOS DE EVALUACIÓN

Teniendo en cuenta que los barrios y sectores de la Comuna resultan insuficiente para realizar un análisis a detalle de la movilidad en el área de estudio, y la gran cantidad de manzanas dificulta la interpretación, se establecieron las zonas de análisis de transporte (ZAT) teniendo en

cuenta los límites inferior y superior definidos por las entidades mencionadas; es decir, se optó por agrupar manzanas con características compartidas teniendo en cuenta tres factores jerarquizados de la siguiente manera: primero las áreas de actividad económica o uso del suelo, segundo el estrato por lado de manzana y por último el límite geográfico definido por el barrio o sector. Generalmente, en la literatura se utilizan los ejes viales para la definición de las ZAT's, sin embargo, para no presentar problemas a la hora de estimar las poblaciones por manzanas de acuerdo al barrio, para este estudio se desestimó ese factor. Con base en lo anterior, resultaron 25 ZAT, de las cuales la más importante es la No. 25 que pertenece a la Terminal Cañaveralejo por su jerarquía intermodal y conexión con el resto de la ciudad por medio del STM.

Dado que el objetivo de la investigación apunta a evaluar el impacto de la implementación de un Sistema de transporte, es necesario contar con mínimo dos escenarios de análisis que permita cuantificar los efectos en la accesibilidad y los cambios en la movilidad del área de estudio; por tal motivo se definieron dos escenarios: ausencia y presencia del STC MIO CABLE asignándole a las variables y cálculos un tratamiento dependiente del año de estudio. Para establecer los años en los que se realizó el análisis se tuvo en cuenta la disponibilidad de información respecto a variables operacionales de algunos modos, y el trabajo de campo realizado en esta investigación. Por consiguiente, el primer escenario se definió para el año 2014 de acuerdo con la información aportada por algunas entidades respecto a la flota operativa de camperos; el segundo escenario se fijó para el año en curso (2019) teniendo en cuenta la recolección de información y los tres años de operación del STC MIO CABLE, donde ya se puede deducir su comportamiento operacional con cargas de pasajeros promedio, evitando las imprecisiones que se puedan presentar en la fase de implementación del sistema en el primer o incluso el segundo año.

La definición de estos dos escenarios permitió clasificar la información recolectada y producida para analizar efectivamente los cambios generados por la incidencia del sistema. En la figura 4 se evidencia la distribución de las zonas de análisis de transporte definidas para esta investigación.

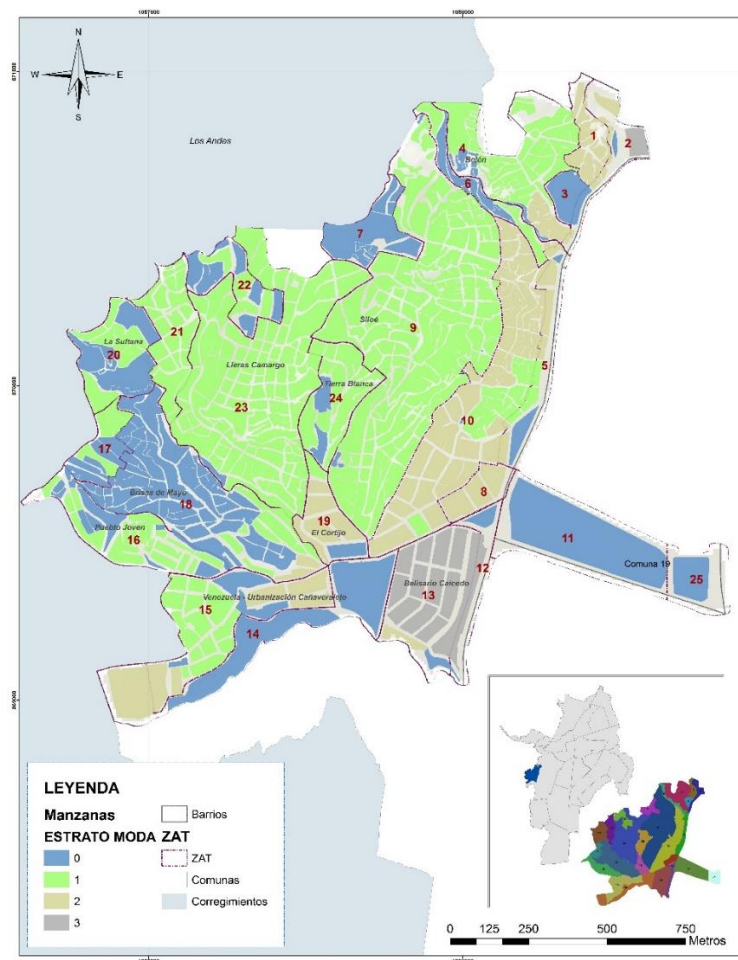


Figura 4. Zona de análisis de transporte

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Cabe aclarar que si bien, la unidad objeto de análisis son las ZAT's, y el estrato a nivel de comuna y barrio no tiene variaciones significativas, se optó por definir una unidad mínima de estudio con el fin de precisar los resultados a un nivel de detalle, el cual son las manzanas. Evaluar desglosadamente estos aspectos permite analizar con minucia el comportamiento de la movilidad de acuerdo al origen de los viajes que surgen desde la unidad mínima y poder realizar un análisis

efectivo de la población residente en cada una de ellas, el impacto generado en la implementación del Sistema y su relación con las variables socioeconómicas propias del área de estudio.

6.1.3 CREACIÓN DE BASES DE DATOS

Para la creación de la base de datos geográfica del proyecto, se usó la información colectada y debidamente depurada; se organizó de acuerdo a los escenarios de análisis y se asignaron atributos geográficos a cada una de las capas de acuerdo a las variables físicas y socioeconómicas, como por ejemplo superficie, distancia, población, estrato, entre otras. Algunas capas fueron complementadas mediante digitalización como por ejemplo las manzanas y la red vial, la cual no correspondía al escenario actual.

En el área de estudio intervienen tres modos de transporte que fueron evaluados independientemente y de manera integral para cada escenario, se asignaron atributos operacionales de acuerdo a la información colectada y también a cada tramo se le asignó un valor de velocidad de recorrido por el mismo de acuerdo a cada sistema de transporte. Para este proceso fue necesario la creación de un mapa de pendientes de la zona de estudio con el propósito de ponderar los tramos viales de cada red y asignarle la impedancia o el costo de desplazamiento por cada uno de ellos. Los modos de transporte objeto de estudio en esta investigación se describen a continuación.

Alimentador MIO

El punto de confluencia es el terminal Cañaveralejo, del cual parten 5 rutas hacia distintos puntos de la zona donde la topografía es plana, ya que, en la parte alta de la Comuna, se dificulta su acceso mediante estos buses. En las tablas 5, 6 y 7 se detallan las variables operacionales por cada día, asignadas como atributo de la capa de las rutas alimentadoras que fueron utilizadas en la presente investigación y que tienen su punto de origen en la terminal Cañaveralejo.

Tabla 5. Parámetros operacionales alimentadores día hábil

ID	RUTA	Longitud. ruta (Km)	Paradas	Flota máxima	Recorrido. (Km/día)	Frecuencia máxima (Bus/h)	Velocidad promedio (Km/h)	Capacidad vehículo
A72A	Jardines de la Aurora- Cañaveralejo	4,7	19	4	706	10	12,7	48
A72B	El Cortijo - Cañaveralejo	3,2	11	3	248	11,4	12,1	
A75	La Sirena – Cañaveralejo	9	30	5	1211	10,9	20,1	
A76	H.U.V. – Cañaveralejo	6,7	20	5	983	10,4	14,8	

Tabla 6. Parámetros operacionales alimentador día sábado

RUTA	Flota máxima	Recorrido (Km/Día)	Frecuencia máxima (Bus/h)	Velocidad promedio. (Km/h)
A72A	5	810	12	12,4
A75	3	879	6,3	19,9
A76	3	629	6	14,9

Tabla 7. Parámetros operacionales alimentador día dominical

RUTA	Flota máxima	Recorrido (Km/Día)	Frecuencia máxima (Bus/h)	Velocidad promedio. (Km/h)
A72A	3	575	8	13,2
A75	3	852	6,3	20,6
A76	2	480	4,8	16,7

Fuente: Elaboración propia a partir de Metrocali (2017)

Camperos

Los atributos de la red de camperos fueron asignados para cada escenario con base en el promedio de los datos colectados en campo por horas pico y valle. En la tabla 8 se detallan los parámetros operacionales asignados a las capas, cabe precisar que, dado que este sistema no cuenta con paradas físicas, surgió la necesidad de definir unas paradas teóricas o pseudo-paradas de acuerdo a los puntos de mayor confluencia de usuarios, con el objetivo de calcular los indicadores de accesibilidad que requieren dicha información. Con base en la información depurada se pudo establecer para el sistema de camperos, que una de las rutas del primer escenario ya no estaba en

funcionamiento debido al uso incrementado del transporte informal en motocicleta, además se presenta una ruta nueva que no estaba en la información de obtenida por la entidad competente para el año 2014, comunicando a las personas que viven en el Barrio Belén con el sector de El Palo.

Tabla 8. Datos operacionales rutas campero en la zona de estudio (2014-2019)

ID	RUTA	Capacidad vehículo promedio.	Longitud del circuito (Km.)	Tiempo promedio trayecto (minutos)	Velocidad promedio (Km/h)	Paradas teóricas	Frecuencia promedio (Veh. /H)	Rata espera (minutos)
1	Cañaveralajejo – La Sirena	14	5,2	19	16,65	8	6	10
2	La Sirena - Centro	14	11,25	42,5	15,87	11	10	6
3	El Palo - Belén	10	2,85	16,5	10,14	5	3	20
4	Belén – El Palo	10	2,85	16,5	10,14	4	3	20
5	El Palo - Lleras	15	2,85	16,5	10,36	3	4	15
6	Lleras – El Palo	15	2,95	17	10	3	4	15
7	Centro – El Palo	14	9,64	32	16,75	8	4	15
8	Chorros - Centro	15	S.I.	S.I.	16	S.I.	6	10
9	Estrella – Sultana – El Palo	10	8,2	S.I.	S.I.	3	S.I.	S.I.

*S.I.: Sin información

Fuente: Elaboración propia, 2019.

MIO CABLE

El sistema de transporte por cable (STC) MIO CABLE, cuenta con una infraestructura compuesta por cabinas suspendidas y fijadas mediante una mono pinza al cable que las transporta. La red comprende cuatro estaciones en dos niveles, dos de ellas funcionan como terminales de acceso y dos como intermedias, pilonas distribuidas según las distancias de los tramos para darle soporte y mitigar la elongación del cable. Los parámetros de este sistema se especifican en las tablas 9 y 10.

Tabla 9. Infraestructura MIO CABLE

<i>ESTACIÓN</i>	<i>LONGITUD DE TRAMO (m)</i>	<i>CAPACIDAD CABINA</i>
TERMINAL CAÑAVERALEJO	1007	10
TIERRA BLANCA	282	
LLERAS CAMARGO	544	
BRISAS DE MAYO		

Tabla 10. Parámetros operacionales MIO CABLE, 2017

<i>DÍA VEL. PROMEDIO (km/h)</i>		HÁBIL		SÁBADO		DOMINICAL	
<i>HORARIO</i>		13		12,5		13	
		DESCENSO Pax./Hora	ASCENSO Pax./Hora	DESCENSO Pax./Hora	ASCENSO Pax./Hora	DESCENSO Pax./Hora	ASCENSO Pax./Hora
6 – 7	Hora pico mañana	697	46	562	41	163	35
9 – 10	Hora valle	148	75	149	69	134	118
18 – 19	Hora pico tarde	73	613	129	439	158	385

Pax.: Pasajeros

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Metrocali, 2017.

Una vez se actualizaron las capas geográficas y se asignaron los atributos a los datos vectoriales se crea la *Geodatabase* o base de datos geográfica (BDG) del proyecto mediante el Software ArcGIS, necesaria para los cálculos y análisis posteriores.

6.2 FASE II: CÁLCULOS Y MEDICIONES

Al tener la información depurada y organizada para cada objetivo del proyecto, se inician los cálculos iniciales que proveen la base de los análisis en cada escenario. En esta etapa se desarrollan actividades concernientes a la operación de los sistemas y la relación con los viajes en cada unidad de análisis.

6.2.1 GENERACIÓN DE REDES DE ANÁLISIS Y CADENAS DE VIAJE

Teniendo como información base la base de datos generada con todas las capas y atributos necesarios para el análisis de accesibilidad geográfica, se procede a generar las redes de análisis para el cálculo de las matrices origen – destino (OD) de tiempos y distancias sobre cada red de transporte para cada escenario planteado. Cabe anotar que este proceso se realizó para cada modo en cada escenario de evaluación, incluyendo las trayectorias peatonales. Este proceso se realiza mediante la herramienta GIS ‘*Network Analysis*’ para la modelación de recorridos por cada una de ellas. Esta herramienta es fundamental para la definición de las matrices origen – destino (OD) y la evaluación de tiempos de recorrido entre dos puntos específicos por cada modo. Las redes de campero en ambos escenarios, la red de alimentador del MIO, la red peatonal y los trayectos de MIO CABLE se importaron como conjunto de datos o ‘*Feature Dataset*’, fueron validados topológicamente para evitar que incumplan alguna regla que impida el correcto tránsito de una entidad por medio de la red, verificando los tramos y las intersecciones; de este modo se procede a la generación de cada conjunto de redes (*Network Dataset*), en la cual se definen los parámetros del análisis de los recorridos como la variable de impedancia y distancia por tramo, según los atributos asignados en la etapa anterior.

Es necesario precisar que el punto de referencia para el origen y destino de viajes de la zona de estudio obligó a tener intermodalidad de los distintos sistemas que operan en la Comuna, por tal motivo, y por su conexión con distintos puntos de la Ciudad mediante el STM, se designó la terminal Cañaveralejo como punto de referencia OD para realizar el análisis de redes en la presente investigación. Con base en lo anterior, se definen las cadenas de viaje desde la unidad mínima de análisis (manzana), promediadas por cada ZAT, obteniendo el centroide como punto de referencia; lo anterior con el fin de obtener los puntos de origen – destino desde cada ZAT hasta

la terminal Cañaveralejo para las cadenas de viaje. La integración de las trayectorias peatonales a las cadenas de viaje provee objetividad al tener cuenta todas las impedancias de cada uno de los desplazamientos en el viaje OD, desde el punto de origen, hasta el abordaje de un modo y su trayecto hasta el destino o hasta la integración con otro modo que le permita llegar al destino.

6.2.2 CREACIÓN DE MATRICES ORIGEN – DESTINO

Posterior a la creación de las redes y la definición de las cadenas de viaje se generan las matrices OD teniendo en cuenta los dos escenarios de evaluación, los tres modos objeto de análisis y la poca cobertura de algunas redes de transporte, para obtener las distancias y tiempos sobre cada red de transporte y en línea recta de todos los desplazamientos posibles desde y hacia los puntos de origen – destino.

Este proceso fue el más dispendioso del proyecto al tener 25 unidades de análisis evaluadas de manera global (conexión de todos a todos los puntos), en cada red de los modos incidentes y para cada escenario de evaluación. Por consiguiente, se establecen los puntos de acuerdo al tipo de modelación: para las unidades de análisis los puntos se definieron como los centroides de las ZAT's, para las trayectorias peatonales se establecieron puntos de centroides de manzanas, paraderos o estaciones de transporte, y también centroides de ZAT; para el recorrido del alimentador y cabinas de MIO CABLE los puntos de origen y destino pertenecen a las paradas y estaciones del sistema.

A continuación, se exponen los factores tenidos en cuenta para establecer los tamaños y modo de uso de las matrices en etapas posteriores.

- Para el cálculo de algunos indicadores y el vector de tiempo mínimo de viaje, todas las matrices fueron calculadas teniendo en cuenta tiempo y distancia sobre la red, y en línea recta; desde y hacia los puntos de origen – destino definidos al momento de la creación de

las redes de análisis mediante la herramienta de ArcGIS '*Network Analysis*', para obtener resultados fiables en las modelaciones.

- El factor de impedancia para estos cálculos se basa en el costo en tiempo que genera desplazarse por cada tramo, medido en minutos.
- Los cálculos de las matrices OD 1 y OD 2, se basan en la agrupación por promedio de trayectos desde las unidades mínimas de análisis (manzanas), hasta los destinos de acuerdo a la ZAT a la que pertenecen, con el fin de limitar la cantidad de datos a la unidad de análisis principal, estableciendo las caminatas para hacer uso de los sistemas. Sirve para ambos escenarios y sus tamaños son de 519x519 y 519x53, agrupados en 25x25 y 25x53 respectivamente.
- Teniendo en cuenta que, para hacer uso del sistema de transporte masivo, y el abordaje y descenso se realiza exclusivamente desde las estaciones y paradas, la OD 3 calcula los recorridos entre las paradas de alimentador en el área de estudio. Sirve para ambos escenarios y su tamaño es de 31x31.
- A partir de los datos generados en la matriz OD 2 se procede a calcular los trayectos desde las unidades de análisis hacia el punto de referencia de entrada/salida de la Comuna y conexión con el resto de la ciudad mediante el STM (ZAT 25 – Terminal Cañaveralejo); la OD 4 comprende las trayectorias peatonales desde cada ZAT, hasta la parada más cercana por medio de la red sumado al trayecto del alimentador desde esa parada a la Terminal. Sirve para ambos escenarios y su tamaño es de 25x1.
- La matriz OD 5 corresponde a los trayectos entre estaciones de MIO CABLE de acuerdo a los parámetros operacionales del sistema. Se utilizó en el segundo escenario de evaluación (2019) y su tamaño es de 4x4.

- La matriz anterior fue complementada de la misma manera que la OD 4, sumando las trayectorias peatonales promedio desde cada ZAT a la estación más cercana, con el trayecto de esa estación hacia la Terminal Cañaveralejo por medio del STC. Esta matriz sirve en el segundo escenario de evaluación y su tamaño es de 25x1.
- La OD 7 corresponde a los trayectos mediante la red de camperos para ambos escenarios desde y hacia los centroides de las ZAT; sin embargo, estos cálculos se quedan sin efecto debido a la distancia excesiva de la red hacia algunos de los centroides, la cual el modelo la asume como nula, lo que generó imprecisiones en los resultados de los recorridos y en el cálculo de indicadores como ITVi y F.R. Su tamaño es de 25x25.
- La OD 8 fue calculada para el primer escenario de análisis, partiendo de la premisa que a diferencia del STM, el abordaje y descenso en el sistema de camperos puede hacerse en cualquier punto sobre la red; de este modo se sumaron los promedios de trayectos peatonales por ZAT al punto más cercano de las rutas hasta la Terminal Cañaveralejo, teniendo en cuenta el camino con menor impedancia. Su tamaño es de 25x1.
- De la misma manera que la matriz anterior, la OD 9 se calculó para el segundo escenario, incluyendo la posible integración al STC MIO CABLE para evaluar el camino con menor impedancia hasta la Terminal. Este cálculo se realizó teniendo en cuenta que el punto de referencia de entrada y salida de la comuna es la ZAT 25 mediante el STM, desestimando los viajes realizados solamente por camperos hacia otros destinos de la ciudad. Su tamaño es de 25x1.

En la tabla 11 se presenta una síntesis de los parámetros de definición mencionados para la creación de las matrices

Tabla 11. Especificaciones de matrices y vectores origen – destino generadas

<i>MATRIZ</i>	<i>MODO</i>	<i>AÑOS DE CÁLCULO</i>	<i>ORIGEN</i>	<i>DESTINO</i>	<i>OBSERVACIÓN</i>
OD 1	Peatonal	1	Centroides ZAT	Centroides ZAT	Promedio de recorrido de manzanas por ZAT
OD 2	Peatonal	1	Centroides ZAT	Paradas	Promedio de recorrido de manzanas por ZAT hasta los paraderos
OD 3	MIO	1	Paradas	Paradas	Recorrido de rutas alimentadoras
OD 4	Peatonal + MIO	1	Centroides ZAT	Terminal Cañaveralejo	Se calculó la parada MIO más cercana a cada ZAT, y se le adiciona la trayectoria peatonal al recorrido de la parada hasta la Terminal
OD 5	MIO CABLE	1	Estaciones	Estaciones	Recorrido en los trayectos entre estaciones de MIO CABLE
OD 6	Peatonal + MIO CABLE	1	Centroides ZAT	Terminal Cañaveralejo	Se calculó la Estación más cercana a cada ZAT, y se le adiciona la trayectoria peatonal al recorrido de la Estación hasta la Terminal
OD 7	Campero	2	Centroides ZAT	Centroides ZAT	Recorrido de rutas campero desde y hacia cada zona de análisis
OD 8	Peatonal + Campero	1	Centroides ZAT	Terminal Cañaveralejo	Promedio de recorrido peatonal de cada ZAT hacia el punto de ruta más cercano para comunicar con el Terminal Cañaveralejo
OD 9	Peatonal + Campero + CABLE	1	Centroides ZAT	Terminal Cañaveralejo	Promedio de recorrido peatonal de cada ZAT hacia el punto de ruta o estación más cercano para comunicar con el Terminal Cañaveralejo

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Con relación a lo anterior, la definición de las matrices y vectores, parte del supuesto por el cual el usuario tiene libre escogencia de uno o dos modos de transporte a usar hasta la terminal Cañaveralejo con el objetivo de realizar una comparación efectiva en los tiempos de viaje. Una vez obtenidas las matrices OD, se definieron los tiempos de viaje y distancias para cada sistema de transporte mediante vectores de tamaño 24x1, haciendo énfasis en que la ZAT 25 queda excluida de estos cálculos. Esta definición aplica para cada uno de los escenarios, modos y se efectúa por medio de la herramienta áreas de servicio del análisis de redes en el Software GIS.

Para este procedimiento se definió la variable denominada accesibilidad geográfica, la cual establece los tiempos y distancias con menor impedancia, para cada modo en cada escenario de estudio. En el cálculo de este vector, se tuvo en cuenta además de la impedancia y la intermodalidad, la rata de espera en cada punto de abordaje; este tiempo fue estimado a partir de las variables operacionales colectadas en la primera fase de este estudio, como la frecuencia de vehículos por cada modo, y se ponderó de acuerdo al número de rutas que pasaban por el punto de abordaje y/o descenso.

Para el escenario 2, se tuvo en cuenta la intermodalidad o combinación de modos en las cadenas de viaje con el objeto de definir el trayecto mínimo, omitiendo parámetros como la integración tarifaria o recargo monetario.

6.2.3 EVALUACIÓN DE CONDICIÓN DE ACCESIBILIDAD URBANA

Para evaluar los cambios de accesibilidad al STM en los dos escenarios planteados, se realizó un análisis bajo tres enfoques expuestos anteriormente, mediante indicadores de accesibilidad que explican los patrones espaciales generados por los efectos del transporte en la dinámica espacio-temporal del territorio. La adaptación de los indicadores para esta investigación se definió con base en la revisión literaria, y a las características propias de las redes de transporte que inciden en el área de estudio.

6.2.3.1 *Enfoque 1: Infraestructura*

La capacidad operacional de los sistemas se evalúa desde enfoque en términos de efectividad del servicio ofrecido a la población residente en el área de estudio. La morfología de las redes, conectividad e infraestructura física permite inferir en el grado de articulación del sistema para responder a la distribución espacial de los flujos en el territorio. La teoría de grafos y análisis topológicos fueron las técnicas principales usadas en este enfoque, se analiza la capacidad

de acceso a los nodos, la distribución y conectividad de los arcos con el objetivo de cuantificar la capacidad ofrecida por la red en términos de configuración espacial mediante el indicador de densidad de Kansky (Murillo Hoyos, 2007), densidad de infraestructura (Huertas Rodríguez & Serrano Florez , 2017) y factor de ruta integral (Lerma, 2017).

El indicador de densidad de Kansky se utilizó para medir la relación entre arcos y nodos, de esta forma evaluar el grado de coherencia de las redes, a partir del esbozo de grafos de cada uno de los sistemas de transporte analizados. En la tabla 12 se exponen los parámetros de este indicador.

Tabla 12. Arcos y nodos de las ZAT's por cada red

<i>CAMPEROS Escenario. 1</i>	<i>CAMPEROS Escenario. 2</i>	<i>ALIMENTADOR Escenario 1</i>	<i>ALIMENTADOR + MIO CABLE Escenario 2</i>
<i>NODOS</i>			
20	19	13	14
<i>TOTAL, ARCOS</i>			
37	33	23	29

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Según la teoría de grafos aplicada a este estudio, los nodos se definieron como el centroide de las unidades de análisis, y los arcos hacen referencia a las rutas o tramos de conexión entre ellas. Por otra parte, el cálculo de densidad de infraestructura se realizó para las redes de los modos de transporte que se desplazan por la superficie vial, y fue ajustado con un factor de ponderación respecto a las paradas y número de rutas por cada unidad de análisis para evaluar la distribución de las redes; en la tabla 13 se especifican los factores de ponderación usados para cada red.

Tabla 13. Factores de ponderación indicador de densidad de infraestructura vial

<i>RED</i>	<i>Capacidad promedio</i>	<i>Rutas totales de la red</i>	<i>Factor ponderación por rutas</i>	<i>Factor de ponderación por capacidad (Cmod/Cmin)</i>
CAMPERO 2014	14	6	No. RUTAS POR TRAMO	1
CAMPERO 2019	14	6		1
ALIMENTADOR	48	6		3,43

**Cmod= Capacidad del modo; Cmin= Capacidad mínima de todos los modos*

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Cabe anotar que la densidad de la red vial general fue desestimada para la evaluación del presente estudio, teniendo en cuenta que el análisis se enfoca en los sistemas de transporte público, y las redes de cada uno de ellos se ve limitada por las condiciones de difícil acceso por la configuración topográfica.

Por otro lado, se calculó el indicador de factor de ruta integral, para cada modo en cada escenario de análisis, con el objeto de interpretar el grado de aproximación de las redes a un trayecto ideal en cuanto a distancias. Cabe precisar que las matrices OD necesarias para estos cálculos únicamente contienen datos de las rutas de cada modo, hubo que contar las trayectorias peatonales para evitar datos erróneos (por debajo de 1); para esta definición se omitieron las unidades de análisis que estaban a una distancia mayor de 300 metros de la ruta analizada, partiendo del supuesto de que el sistema es inaccesible por el usuario cuando éste deba recorrer una distancia mayor a 300 metros en zona de ladera.

6.2.3.2 Enfoque 2: Servicio y operación

Desde esta perspectiva se evalúa la calidad de los servicios de transporte ofrecidos en términos de eficacia y capacidad para responder a la necesidad de movilidad urbana en el área de estudio usando medidas agregadas y desagregadas. Teniendo como insumo base para los cálculos

las matrices OD generadas y los parámetros operacionales de cada red, se procede al cálculo de indicadores como el índice de trazado y velocidad (ITVi), (Ramírez Cajigas, 2018), para evaluar la eficacia de los servicios ofrecidos con base en los tiempos de recorrido sobre la red. Por otro lado, se usó el Índice de Provisión de Transporte Público (IPTP), (Jurado Barco & Tovar Mambuscay, 2016), como primer indicador que integra los modos en ambos escenarios, para calcular la accesibilidad topológica a cada uno de los sistemas de transporte, con el fin de definir claramente la capacidad y eficiencia en los servicios ofertados.

Se calculó el Índice de trazado-velocidad para evaluar la eficiencia de las redes, este indicador, al ser un derivado del factor de ruta se calcula de manera similar, teniendo en cuenta las matrices OD generadas.

Para conocer la incidencia de la distribución de los flujos en la movilidad de la Comuna, el análisis de accesibilidad urbana para este estudio requiere la integración de variables socioeconómicas y aspectos demográficos con el objetivo de establecer el grado de participación de la comunidad mediante los sistemas de transportes disponibles. Con relación a lo anterior, se optó por evaluar para este enfoque el índice de provisión del transporte público (IPTP); este indicador, requiere una variable social que es la población de cada unidad de análisis, para ello se usó la población potencial calculada en pasos anteriores, la cual tiene en cuenta los habitantes entre edades de 5-65 años como potenciales usuarios de los sistemas de transporte; así mismo tiene en cuenta el área de cada unidad, los parámetros operacionales de cada sistema y la infraestructura de paradas, las cuales fueron definidas para el sistema de camperos como los puntos de mayor afluencia de usuarios o con mayor rata de espera para el abordaje y descenso de los vehículos.

Con base en la información colectada y depurada, se calculó el IPTP en dos ámbitos para cada escenario de acuerdo con los parámetros de días hábiles (DH) y no hábiles (DNH), con el

propósito de observar la variación operacional de dichos días. En la tabla 14 se exponen los factores de peso asignados según parámetros operacionales.

Tabla 14. Parámetros y factores de ponderación para el IPTP

<i>MODO</i>	<i>FRECUENCIA 1 (DH) Prom. – Veh/h</i>	<i>CAPACIDAD Prom.</i>	<i>FRECUENCIA 2 (DNH) Prom. – Veh/h</i>
<i>Campero</i>	4,85	14	6
<i>Alimentador</i>	10,68	48	7,23
<i>MIO CABLE</i>	300	10	260
FACTORES DE PESO			
PRIMER ESCENARIO			
	Wci	Wfi	Wfi2
<i>Campero</i>	1	1	1
<i>Alimentador</i>	3,43	2,20	1,21
SEGUNDO ESCENARIO			
<i>Campero</i>	1,4	1	1
<i>Alimentador</i>	4,8	2,20	1,21
<i>MIO CABLE</i>	1	61,86	43
<i>Frecuencia (123 v/h) x Trayecto</i>		25,36	20,50

Fuente: Elaboración propia, 2019.

6.2.3.3 Enfoque 3: Cobertura

Desde este enfoque se utilizan indicadores que permitan inferir en la dinámica de los sistemas de transporte y su relación con la comunidad; por tal motivo, los aspectos a analizar más importante por parte de los indicadores se centran en los tiempos de desplazamiento hasta el nodo de referencia de entrada y salida de la comuna teniendo en cuenta la impedancia, y la cobertura de población ofrecida por cada sistema. La información resultante desde este enfoque permite evaluar la cuantificación del impacto generado por la implementación del STC MIO CABLE desde la accesibilidad urbana.

Usando la herramienta ‘*Network Analysis*’ de ArcGIS, se dispone a cuantificar la cobertura de acceso a cada sistema, usando las áreas de influencia respecto a tiempos de los puntos de referencia de paradas o estaciones, debido a que resulta impreciso estimar los recorridos mediante

distancias por las características topográficas de la zona. Cabe resaltar que debido a que la red de alimentadores no cambia en los escenarios, se optó por complementarla con la red de MIO CABLE para el año 2019, con el fin de dejar alternativa al usuario en la escogencia del modo para salir o entrar a la Comuna mediante el STM.

La superficie de cobertura de cada modo de transporte fue segregada por cada unidad de análisis con el objetivo de cuantificar el porcentaje de población potencial cubierta bajo un parámetro de impedancia, definido como accesible cuando el tiempo de caminata máximo del usuario sea: 8 minutos hasta la red de STM y cinco minutos a la infraestructura de transporte tipo campero. En la tabla 15 se aprecian los parámetros de cada sistema para la definición áreas de influencia, teniendo como umbral el tiempo de acceso a la red por medio de caminata.

Tabla 15. Parámetros para análisis de influencia

<i>MODO</i>	<i>ESCENARIO</i>	<i>ENTIDAD DE ANÁLISIS</i>	<i>Tiempo de influencia directa por caminata (min)</i>
CAMPERO	1 – 2	RUTA	0 – 5
ALIMENTADOR + MIO CABLE	2	PARADAS – ESTACIONES	0 - 8

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La definición del tiempo del área de influencia directa a la infraestructura para cada sistema fue asignado teniendo como prioridad los modos del STM por la cobertura y conectividad que tiene con el resto de la ciudad, mientras que las zonas accesibles por medio de los camperos apuntan hacia laderas y zonas marginadas; por tal motivo, y de acuerdo a la demanda y necesidad de viajes, se establece una impedancia mayor para el acceso a la infraestructura de las STM. Los tiempos fueron asignados teniendo en cuenta que una caminata con duración mayor a diez minutos

genera demasiada fricción para las distancias, máxime en zonas con condiciones topográficas considerables, por consiguiente, se optó por dejar una impedancia máxima para ocho minutos.

Para el segundo escenario de análisis, se utilizó el indicador de gravedad (Murillo Hoyos, 2007) con el fin de caracterizar la atracción de viajes hacia los nodos del sistema implementado, es decir, las estaciones MIO CABLE. Es de precisar que para el cálculo de la impedancia en este indicador se usó los vectores OD desde las estaciones del STC hacia la terminal Cañaveralejo, como nodo potencial de atracción de todos los viajes.

Finalmente, para determinar la accesibilidad territorial urbana integrando variables propias del territorio, la disponibilidad de los servicios de transporte respecto a la demanda de viajes, se estimó el índice de accesibilidad propuesto por (GIRÃO, Pereira, & Fernandes, 2017), con el objeto de evaluar la efectividad de las redes.

El índice se compone por tres indicadores ya expuestos de modo general en el marco teórico, para esta investigación se definieron de la siguiente manera:

- Indicador 1: Relaciona la sumatoria de las áreas cubiertas por cada modo en las unidades de análisis, ponderadas por los factores de peso operacionales.
- Indicador 2: Evalúa la sumatoria del número paradas o estaciones por cada modo en las unidades de análisis, ponderadas por los factores de peso.
- Indicador 3: Detalla la sumatoria de la estimación de viajes potenciales por cada ZAT de acuerdo a la población de cada una, ponderados por los factores de peso.

Así como para el cálculo del IPTP, para la estimación de los factores de peso de este índice, fue necesario el detalle de los parámetros operacionales de cada modo de transporte, en la tabla 16 se relacionan las variables necesarias para calcular los factores de ponderación.

Tabla 16. Variables operacionales para el índice de accesibilidad

MODO	Capacidad máxima	Velocidad promedio de operación – DH (Km/h)	Velocidad promedio de operación – DNH (Km/h)	Frecuencia promedio DH (Vehículo/hora)	Frecuencia promedio DNH (Vehículo/hora)
1 – ALIMENTADOR	48	14,93	16,28	10,68	7,23
2 – CAMPERO	14	13,24	13,24	4,85	6
3 - MIO CABLE	10	13	12,5	300	260
4 - INTEGRACIÓN MIO	2 ALTERNATIVAS DE USO (MIO – MIO CABLE)				

*DH - Día hábil, DNH - Día no hábil

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la tabla 17 se aprecian los factores de peso para cada modo objeto de análisis en el índice de accesibilidad.

Tabla 17. Asignación de factores de peso para el índice de accesibilidad

ID MODO	DH	DNH	Promedio
1	1,00	1,00	1
2	0,59	0,55	0,57
3	0,54	0,49	0,51
4	0,77	0,74	0,76

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Con base en la información de las Encuestas de Metrocali para el año 2015, se realizaron estimaciones para las unidades de análisis teniendo en cuenta la población de la misma y la partición modal de los sistemas de transporte para las distribuciones de los viajes generados en la Comuna 20. Cabe resaltar que el estudio realizado por (Steer Davies Gleave, 2015) para Metrocali en el año 2015 contiene datos de encuestas realizadas en el año 2014 a nivel general de ciudad, los datos reportados para la Comuna 20 se dividieron en dos unidades territoriales de análisis de movilidad (UTAM), las cuales fueron adaptadas a las unidades de análisis de este estudio. La partición modal presentada en la tabla 18, expone el uso de los modos de transporte público a nivel general y por estrato; de acuerdo al estrato moda del área de estudio fue factible acoger dichos

datos seleccionados por los modos de mayor uso en la Comuna (MIO, Taxi, Campero y Moto-Taxi), excluyendo de los análisis los sistemas para los cuales no se tiene información (Taxi y moto-taxi).

Tabla 18. Estimaciones de viajes según partición modal de Encuesta de Metrocali

ESCENARIO 1 – 2014			
MODO	% GENERAL	% ESTRATO 1	% COMUNA 20
MOTOTAXI	4,7%	6%	7,89%
CAMPERO	6,2%	20%	26,32%
MASIVO	43,3%	41%	53,95%
TAXI	19,6%	9%	11,84%
UTAM 2001: 10000 Viajes totales para 11 ZAT's		UTAM 2002: 25000 Viajes totales para 14 ZAT's	
ESCENARIO 2 – 2019			
MIO 61.84%, CAMPEROS 26.32%, TAXI 11.84%			
STM	6184	STM	15460
CAMPERO	2632	CAMPERO	6580
TAXI	1184	TAXI	2960

Fuente: Elaboración propia a partir de (Steer Davies Gleave, 2015).

Dado que la implementación del STC MIO CABLE inició operaciones en el año 2016, y la creación de nuevas encuestas OD demandan costos muy elevados que no fueron asumidos en este proyecto, para el segundo escenario se optó por acoger la demanda de usuarios del modo Moto-Taxi y adaptarla como si fuesen usuarios del STC MIO CABLE, teniendo en cuenta que los usuarios de alimentadores, principalmente los que viven en zonas de ladera alta, pueden también hacer uso de este sistema.

Teniendo en cuenta que la unidad de análisis son las ZAT's, la estimación presentada en la tabla anterior fue segregada por cada UTAM, de acuerdo a la ponderación por área y población de cada una de las 25 unidades de análisis, con el propósito de definir la cantidad de viajes potenciales generados por cada ZAT.

6.3 FASE III: ANÁLISIS DE RELACIONES

Mediante técnicas estadísticas como el coeficiente de correlación de Pearson, o el índice de Morán se analizan las relaciones lineales y autocorrelaciones entre los indicadores calculados en la fase anterior y su relación con las variables que inciden en el comportamiento de la movilidad en el área de estudio.

También se usó para algunas relaciones el valor de probabilidad de p (p-value), como nivel de significancia más pequeño que conduce al rechazo de la hipótesis nula h_0 . El Software utilizado en esta investigación para analizar las relaciones entre variables e indicadores son IBM SPSS Statistics, GEODA y ArcGIS.

6.4 FASE IV: ANÁLISIS DEL IMPACTO TERRITORIAL Y EXCLUSIÓN

Una vez obtenidos los resultados y validados mediante técnicas estadísticas, se procede a evaluar en términos de tiempos de viaje, cobertura y accesibilidad, los cambios en la dinámica territorial de la implementación del sistema de transporte MIO CABLE. En esta fase se realiza un análisis de los resultados obtenidos mediante el cálculo de la accesibilidad territorial urbana y su relación con las variables que inciden en la movilidad del área de estudio.

Los gradientes de tiempos de viaje evidencian el impacto en los desplazamientos, y el análisis desde el enfoque de cobertura provee información para cuantificar los efectos en la segregación socioespacial de la población que hace uso del transporte público. Estos factores permiten la interpretación de algunos aspectos de la dinámica territorial y su relación con relación del usuario con la oferta de bienes y servicios; pues de acuerdo con autores como (Vivas Pacheco, 2011), (Villar, 2017), (Hernández, 2017) y (Jara & Carrasco, 2009), coinciden en que los quiebres en las interacciones sociales del individuo y su territorio segmentan las oportunidades de participación generando exclusión social.

7. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En este apartado se exponen los resultados derivados de la metodología, por cada fase metodológica, las cuales corresponden a cada uno de los objetivos específicos planteados en esta investigación. Se realiza un análisis y discusión de acuerdo con la revisión bibliográfica y en la etapa de validación se evalúa la correspondencia lineal de los indicadores y su relación con algunas variables incidentes en la accesibilidad y dinámica territorial.

7.1 INFORMACIÓN BASE PARA LA BDG

En la figura 5 se puede apreciar la reclasificación del Raster generado para el área de estudio de acuerdo a las categorías establecidas según los rangos de pendientes. Se evidencia que las unidades de análisis 8, 11, 12, 13, 14, 25 presentan pendientes muy mínimas que indican que la zona es plana, mientras que para las ZAT's 4, 6, 9, 24 presentan pendientes muy fuertes, que impiden el acceso por vehículos, por tanto, la mayoría de tramos viales de esa zona son de uso netamente peatonal como escaleras y pasos angostos.

El desglose de la información de pendientes por cada tramo permitió asignar un valor de pendiente promedio para calcular la impedancia de recorrido por cada uno de éstos.

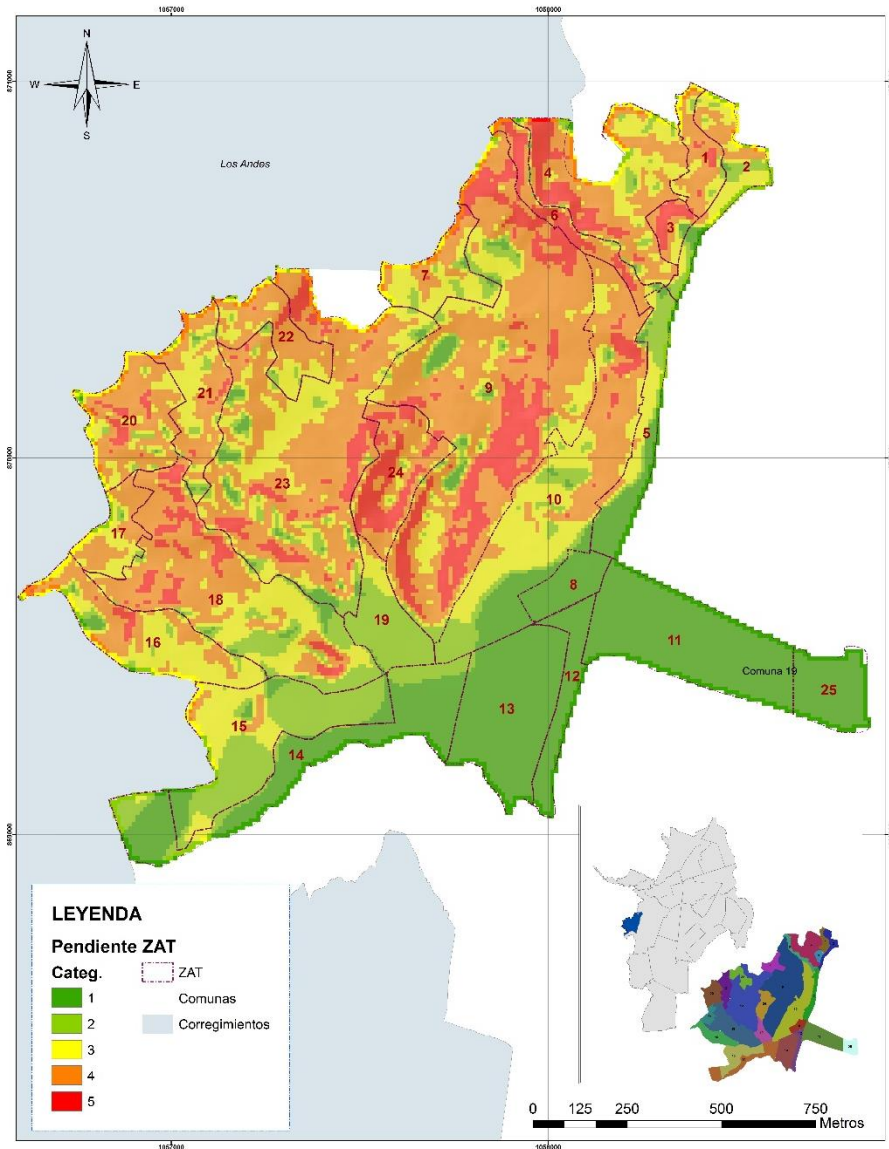


Figura 5. Mapa de pendientes reclasificado

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Una vez armonizados los sistemas de referencia de las capas actualizadas y digitalizadas; de haber realizado la asignación de atributos físicos y socioeconómicos a las capas vectoriales de manzanas, barrios, ZAT's; de estimar los valores de impedancia de cada red de transporte por la superficie vial y agregarles atributos operacionales a las capas de estos sistemas, se crea la BDG del proyecto como insumo para los análisis realizados.

7.2 ANÁLISIS DE REDES Y EVALUACIÓN DE ACCESIBILIDAD URBANA

En la figura 6 se exponen los dos escenarios de análisis con las redes de transporte generadas para cada uno de ellos, así mismo se muestran las pseudo-paradas para los camperos, las paradas del alimentador, y las estaciones y trayectos del STC MIO CABLE.

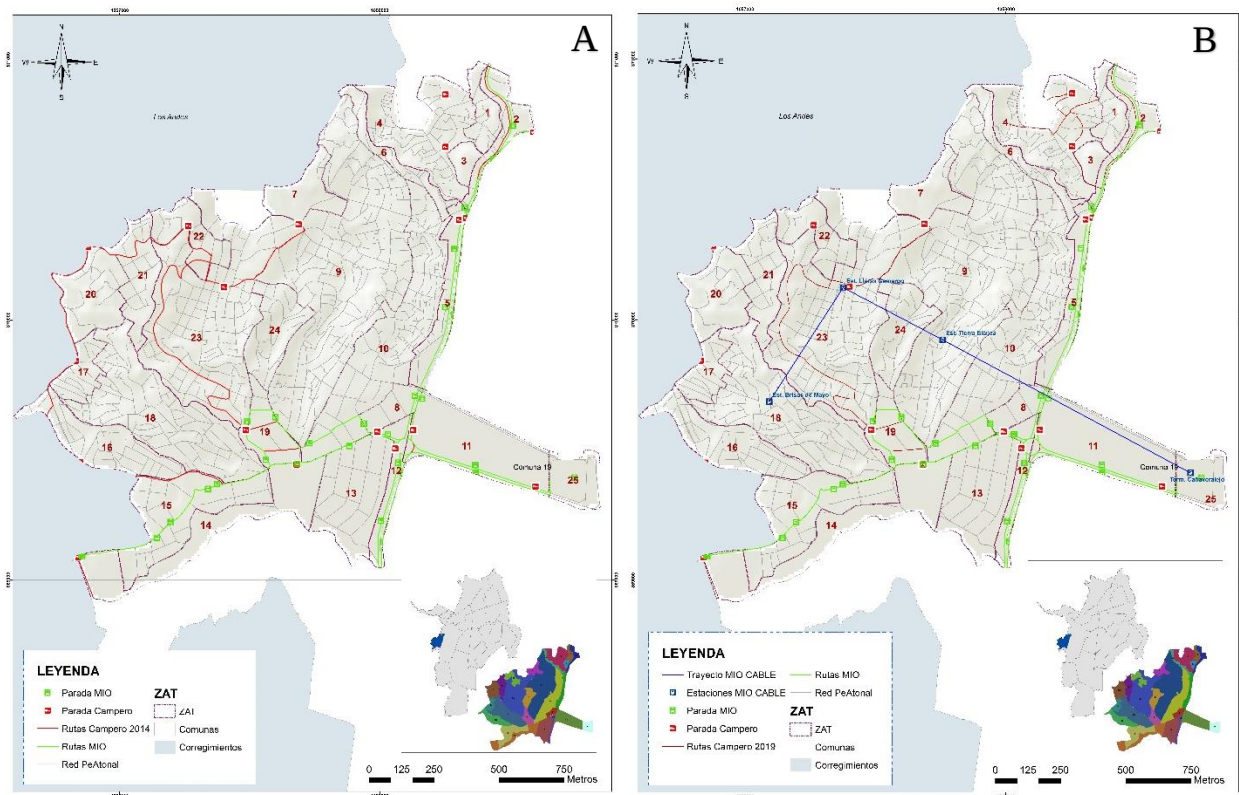


Figura 6. Redes de transporte para ambos escenarios. A: Escenario 1 – 2014, B: Escenario 2 - 2019

Fuente: Elaboración propia, 2019.

7.2.1 CADENAS DE VIAJE Y MATRICES ORIGEN – DESTINO

Dentro del análisis de redes es necesario priorizar, quizá el actor vial más importante, el peatón (Banco Interamericano de Desarrollo, 2016), (Carvajal, 2016), (Moyano, Prieto, & Martínez, 2018), (Álvarez, Méndez, & Martins, 2014) y (Santuario Torres, 2016). Por otro lado, según autores como (Bocarejo & Velásquez, 2012), (Escobar , Tamayo, & Holguín, 2016), (Escobar & García, 2011) y (Velásquez Villada, 2018); infieren que la modelación de los sistemas de transporte mediante las herramientas de análisis espacial y de redes, debe ser integral teniendo

en cuenta el punto de partida del usuario, su recorrido hasta una parada para abordar algún modo en específico y su intermodalidad o posibles transbordos necesarios para llegar a su destino.

Específicamente (Carvajal, 2016) en su estudio, describe la arquitectura y operatividad de esta terminal, la integración con otros modos y los accesos peatonales evaluados desde el enfoque de la infraestructura, concluyendo que la configuración espacial debe optimizarse para mitigar el esfuerzo del usuario al hacer los transbordos; dado lo anterior, se plantea la definición de las cadenas de viaje para este estudio con un inicio y/o final de recorrido usando los desplazamientos peatonales, acompañados por la alternativa de escogencia entre un modo de transporte o la integración con otro para realizar el viaje hasta el destino.

En la figura 7 se detalla un ejemplo de una cadena de viaje desde el centroide de una ZAT, hacia la terminal Cañaveralejo haciendo uso del sistema de transporte tipo campero, con y sin la integración de la trayectoria peatonal.

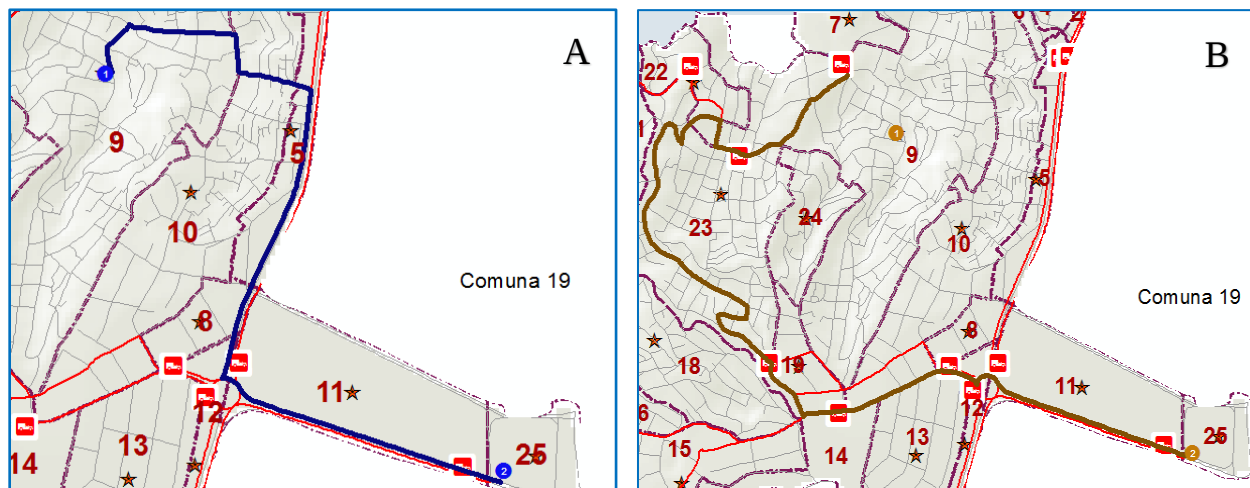


Figura 7. Comparación de cadenas de viaje. A: Con trayecto peatonal, B: Sin trayecto peatonal

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Como se aprecia en la figura anterior, la omisión de las trayectorias peatonales genera un grado de incertidumbre alto en los resultados, especialmente en áreas donde las redes de transporte no tienen suficiente cobertura.

La inclusión de las trayectorias peatonales a las redes de transporte analizadas permitió la creación de las matrices OD. En el Anexo 2 se aprecia de manera detallada la información recolectada en cada una de las matrices y vectores, organizadas en cuadros de Excel y modificadas para establecer los tiempos de viaje hasta la terminal Cañaveralejo. Los datos resultantes de las matrices permiten el cálculo de los tiempos medios de viaje por cada modo de transporte sobre su red hacia la terminal Cañaveralejo.

7.2.2 TIEMPOS DE VIAJE – MODELO DE ACCESIBILIDAD GEOGRÁFICA

Cabe aclarar que, si bien los cálculos se realizaron de manera global, entre todas las unidades de análisis, los resultados que se presentan a continuación son referentes a la accesibilidad geográfica hacia la ZAT 25 o terminal Cañaveralejo.

En la figura 8 se presentan los tiempos de viaje para la red de camperos en ambos escenarios, mediante curvas isócronas. Las curvas se muestran para una accesibilidad inmediata de dos minutos e intervalos cada cinco minutos, estos tiempos son específicamente de la red de camperos, teniendo en cuenta la trayectoria peatonal pero no la espera para el abordaje del modo.

En el segundo escenario se evidencia un aumento en los tiempos de viaje en la parte alta de la Comuna, afectando a las ZAT's 16, 17, 20, lo cual se debe a la eliminación de la ruta de la Sultana. Por el contrario, la disminución en los tiempos de las ZAT's 4 y 6, en aproximadamente cinco minutos se debe a la incorporación de la ruta Belén.

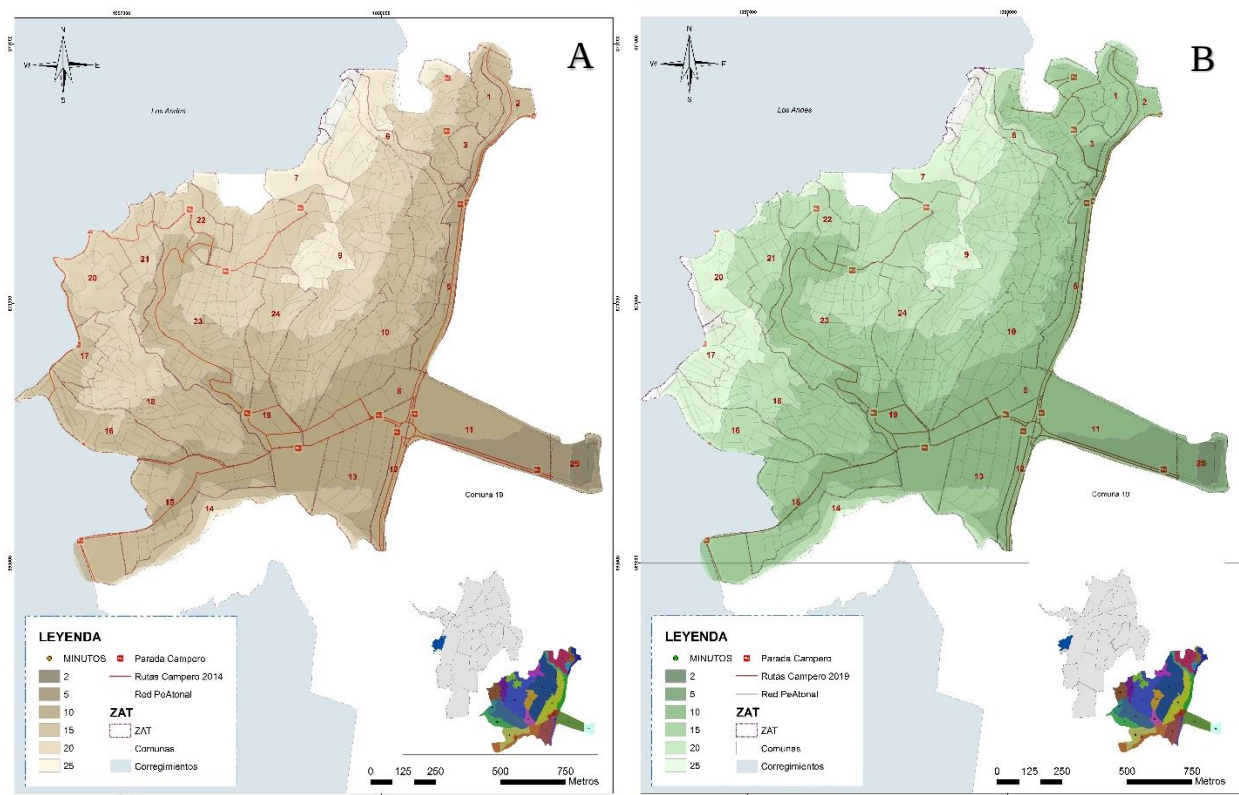


Figura 8. Curvas isócronas de la red de camperos. A: Escenario 1 – 2014, B: Escenario 2 - 2019

Fuente: Elaboración propia, 2019

Bajo los mismos parámetros de tiempo de acceso inmediato, fueron generadas las curvas isócronas para la red de alimentadores sumado a las trayectorias peatonales desde cada estación o parada en el escenario 1. Para el segundo escenario se agregaron los trayectos de MIO CABLE, bajo el supuesto de que el usuario tiene la alternativa de escogencia de cualquiera de los dos modos. La figura 9 plantea los tiempos de recorrido para ambos escenarios, dado que la red de STM no cambia para los escenarios, los tiempos de acceso a la infraestructura de transporte solo se ven afectados en las zonas de influencia directa de las estaciones de MIO CABLE, como por ejemplo las unidades de análisis 18, 24, 9.

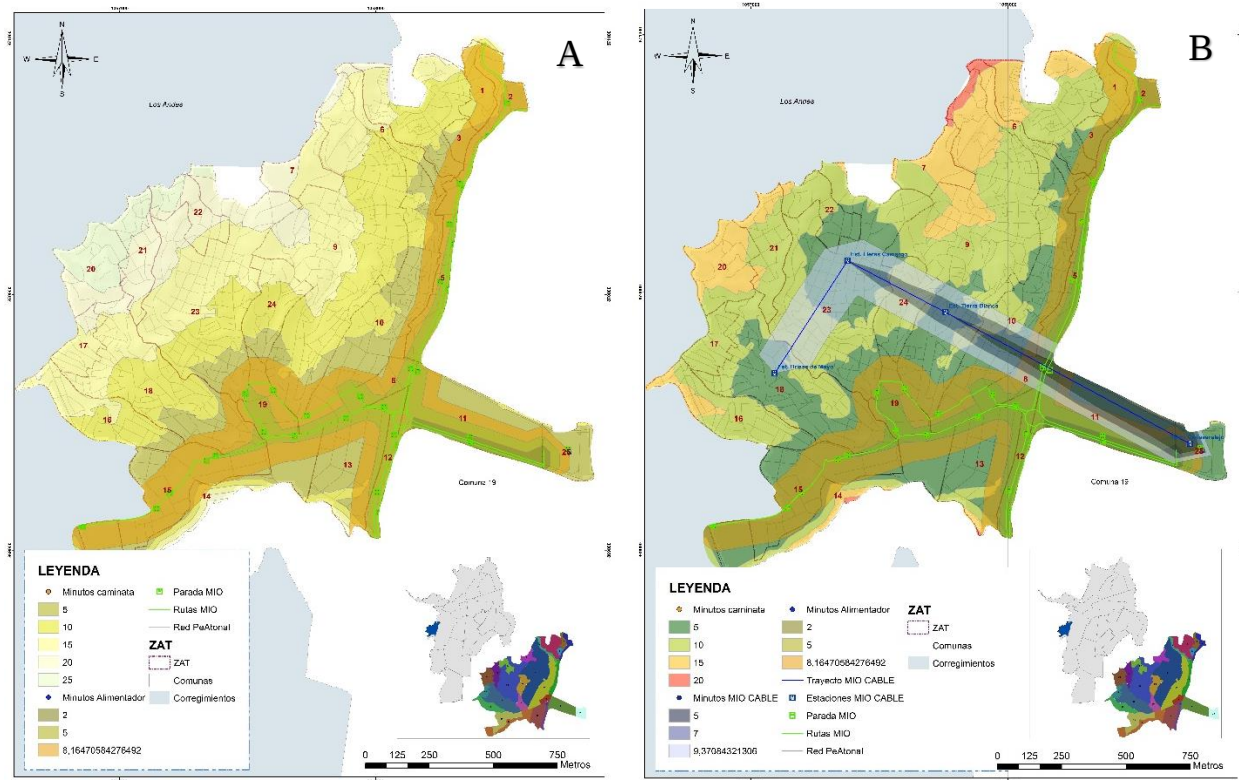


Figura 9. Curvas isócronas de la red de STM. A: Escenario 1 – 2014, B: Escenario 2 - 2019

Fuente: Elaboración propia, 2019

Geográficamente es evidente el impacto generado por la implementación del STC en la accesibilidad geográfica, reduciendo los tiempos de caminata desde las paradas o estaciones hasta en diez minutos. Cabe precisar que las curvas isócronas presentadas para todos los modos integran las trayectorias peatonales de manera independiente a las redes de transporte. De igual manera que el sistema tipo camperos, estos tiempos de recorrido no incluyen los tiempos de espera en las paradas.

En la figura 10 se presenta el área influencia del sistema tipo campero, según la cobertura definida por una caminata hasta la infraestructura de la red de máximo 5 minutos. Por otro lado, en la figura 11, se evidencia la cobertura según área de influencia del sistema de transporte masivo en ambos escenarios, teniendo en cuenta un tiempo de acceso a la red de infraestructura de máximo 8 minutos mediante recorrido peatonal o caminata. Al igual que en el cómputo de los tiempos de

viaje, dado que la red de alimentadores no cambia, para el segundo escenario se adicionó la red de MIO CABLE al STM.

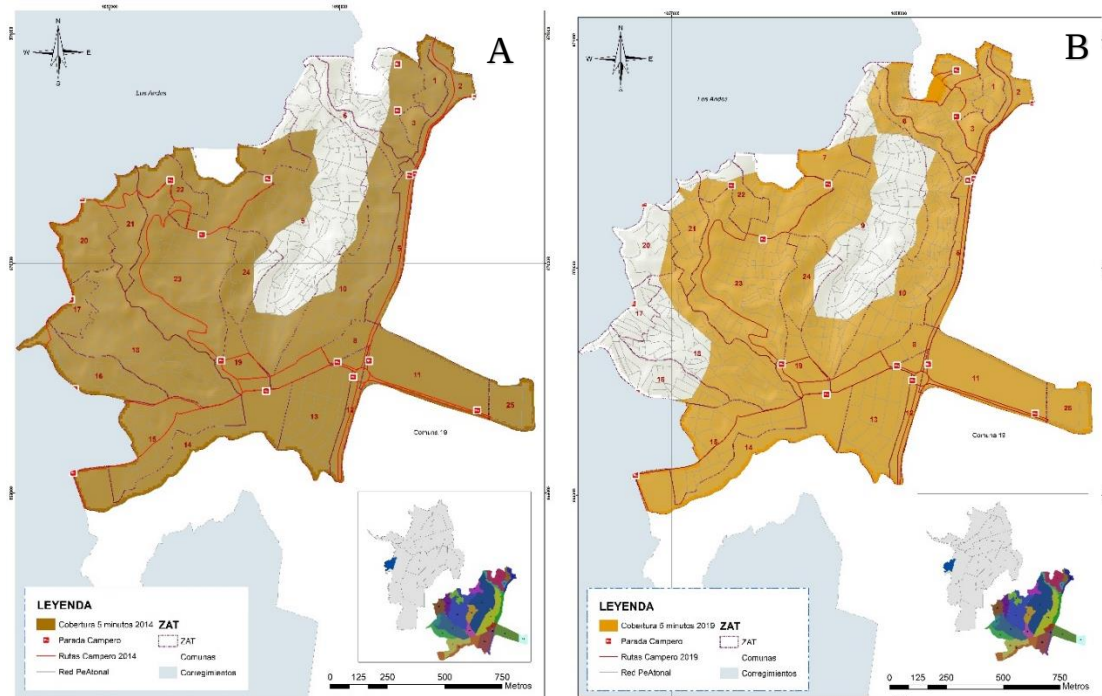


Figura 10. Áreas de influencia del sistema tipo campero. A: Escenario 1 – 2014, B: Escenario 2 - 2019
Fuente: Elaboración propia, 2019.

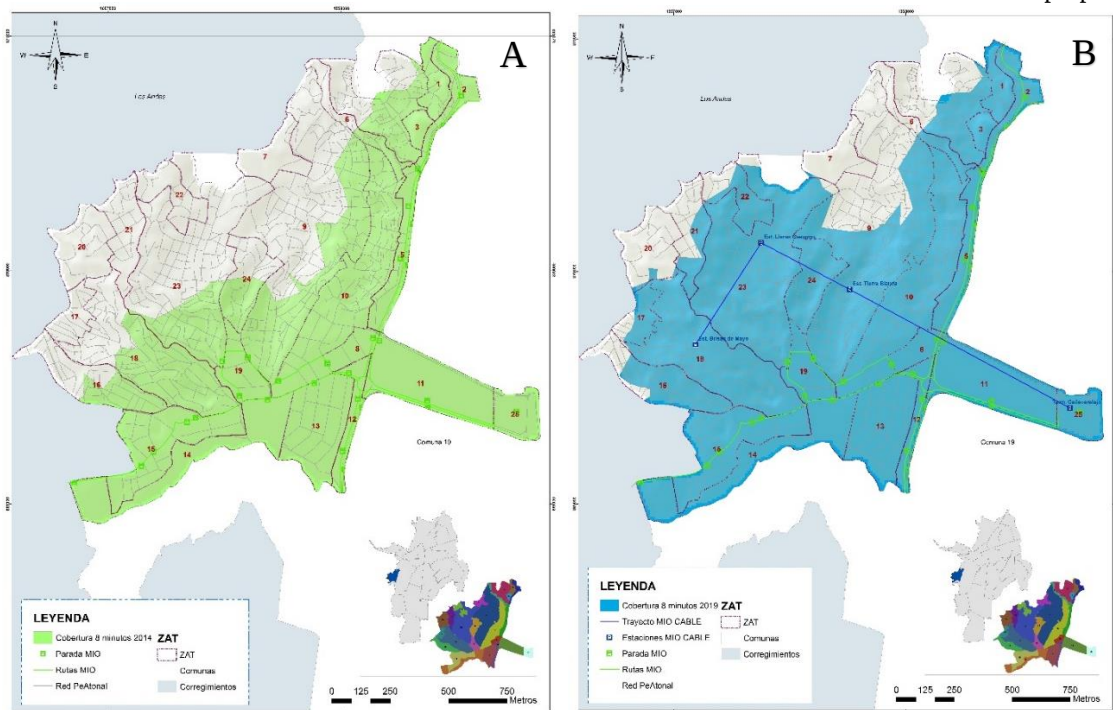


Figura 11. Áreas de influencia del sistema de transporte masivo
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Con la información proporcionada en los vectores definidos para cada sistema de tamaño 24x1, se establecen los trayectos mínimos para cada unidad de análisis y el modo de transporte que permite el desplazamiento con el propósito de comparar efectivamente la eficiencia de los recorridos por cada modo hasta la terminal Cañaveralejo. En las tablas 19 y 20 se exponen los resultados de esta variable para cada escenario, representada en colores para facilitar su interpretación, de acuerdo al modo de transporte o la combinación de dos de ellos.

Tabla 19. Accesibilidad geográfica escenario 1

MODOS DISPONIBLES AÑO 2014							TRAYECTO MÍNIMO	
ZAT	CAMPERO		ALIMENTADOR		PEATONAL		Tiempo minutos	Distancia metros
	Tiempo minutos	Distancia metros	Tiempo minutos	Distancia metros	Tiempo minutos	Distancia metros		
1	28,51	2235,17	21,93	2077,17	29,65	2003,93	21,93	2077,17
2	26,42	2147,51	19,81	1989,51	27,53	1916,27	19,81	1989,51
3	26,71	1956,58	17,01	1798,58	24,74	1725,34	17,01	1798,58
4	30,57	2139,98	20,65	1981,98	28,38	1908,74	20,65	1981,98
5	22,62	1418,04	12,63	1247,82	16,25	1186,80	12,63	1247,82
6	34,06	2198,42	22,93	2058,19	29,38	1831,77	22,93	2058,19
7	33,79	3433,48	27,62	2216,36	31,16	1886,97	27,62	2216,36
8	21,23	990,07	12,40	977,55	12,69	951,38	12,40	977,55
9	35,08	2043,73	24,55	1808,21	26,04	1580,53	24,55	1808,21
10	27,51	1373,68	17,52	1525,49	16,80	1156,97	16,80	1156,97
11	9,18	542,59	12,26	902,46	7,23	542,59	7,23	542,59
12	10,71	970,76	9,69	970,72	12,94	970,76	9,69	970,72
13	13,92	1230,32	16,54	1576,16	16,40	1230,32	13,92	1230,32
14	15,99	1734,16	12,94	1762,69	23,82	1734,16	12,94	1762,69
15	16,19	1796,16	11,32	1638,15	24,69	1796,16	11,32	1638,15
16	28,41	2249,26	22,39	2051,16	30,74	2138,89	22,39	2051,16
17	28,56	2691,67	31,13	2576,94	34,31	2315,94	28,56	2691,67
18	29,18	2000,35	24,24	2068,68	28,36	2000,35	24,24	2068,68
19	15,69	1534,49	10,60	1337,98	19,88	1473,09	10,60	1337,98
20	34,27	3336,00	36,40	2464,49	44,65	2621,91	34,27	3336,00
21	31,26	2674,71	32,97	2317,07	39,46	2471,35	31,26	2674,71
22	29,89	2932,10	31,42	2457,48	37,88	2408,10	29,89	2932,10
23	24,46	2319,81	24,68	2081,80	31,14	2032,42	24,46	2319,81
24	31,10	1823,05	20,95	1956,22	28,12	1832,49	20,95	1956,22

Fuente: Elaboración propia, 2019

Tabla 20. Accesibilidad geográfica escenario 2

MODOS DISPONIBLES AÑO 2019											TRAYECTO MÍNIMO	
ZAT	CAMPERO		CAMP+MIOCAB		ALIM+MIOCABLE		MIO CABLE		PEATONAL			
	Tiempo (min)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Distancia (m)	Tiempo (min)	Distancia (m)
1	28,40	2274,48	28,40	2274,48	21,93	2077,17	26,88	1807,17	29,65	2003,93	21,93	2077,17
2	26,41	2147,51	26,41	2147,51	19,81	1989,51	26,49	1818,50	27,53	1916,27	19,81	1989,51
3	17,06	1956,58	17,06	1956,58	17,01	1798,58	22,55	1562,09	24,74	1725,34	17,01	1798,58
4	26,26	2350,46	26,26	2350,46	20,65	1981,98	27,64	1804,99	28,38	1908,74	20,65	1981,98
5	15,40	1418,04	15,40	1418,04	12,63	1247,82	17,24	1219,37	16,25	1186,80	12,63	1247,82
6	26,84	2198,42	26,84	2198,42	22,93	2058,19	24,74	2074,26	29,38	1831,77	22,93	2058,19
7	25,76	3330,78	18,72	2052,39	19,04	2153,38	19,04	2153,38	31,16	1886,97	18,72	2052,39
8	14,01	990,07	14,01	990,07	12,40	977,55	11,13	820,97	12,69	951,38	11,13	820,97
9	27,86	2043,73	14,11	1464,84	15,91	1604,12	15,91	1604,12	26,04	1580,53	14,11	1464,84
10	20,29	1373,68	20,29	1373,68	16,86	1672,32	16,05	1090,92	16,80	1156,97	16,05	1090,92
11	9,18	542,59	9,18	542,59	12,26	902,46	4,29	321,70	4,29	321,70	4,29	321,70
12	10,71	970,76	10,71	970,76	9,69	970,72	10,51	788,01	12,94	970,76	9,69	970,72
13	13,92	1230,32	13,92	1230,32	16,54	1576,16	15,62	1169,70	16,40	1230,32	13,92	1230,32
14	15,97	1734,16	15,97	1734,16	12,94	1762,69	23,92	1729,22	23,82	1734,16	12,94	1762,69
15	23,40	1796,16	23,40	1796,16	11,32	1638,15	21,25	2718,82	24,69	1796,16	11,32	1638,15
16	33,01	2209,16	33,01	2209,16	18,77	2495,44	18,77	2495,44	30,74	2138,89	18,77	2495,44
17	30,34	2315,94	18,20	2418,96	16,89	2422,33	16,89	2422,33	34,31	2315,94	16,89	2422,33
18	23,29	2000,35	11,30	2110,87	15,67	2350,59	15,67	2350,59	28,36	2000,35	11,30	2110,87
19	13,29	1534,49	13,29	1534,49	10,60	1337,98	15,88	1622,83	19,88	1473,09	10,60	1337,98
20	27,80	2729,74	24,75	2191,86	23,47	2356,55	23,47	2356,55	44,65	2621,91	23,47	2356,55
21	23,90	2674,71	19,56	1961,91	16,66	1987,76	16,66	1987,76	39,46	2471,35	16,66	1987,76
22	23,71	2686,92	11,96	1922,18	12,87	1828,38	12,87	1828,38	37,88	2408,10	11,96	1922,18
23	16,65	2838,15	9,13	1613,64	13,13	1825,50	13,13	1825,50	31,14	2032,42	9,13	1613,64
24	23,88	1823,05	14,32	1858,62	14,66	1516,17	14,66	1516,17	28,12	1832,49	14,32	1858,62

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Con base en las tablas anteriores es posible realizar una comparación efectiva de la accesibilidad geográfica por modo desde las unidades de análisis hasta la terminal Cañaveralejo; reflejando las trayectorias mínimas de viaje (TMV) y el modo usado según el color en cada escenario. Los cálculos proveen información de tiempo y distancia del modo que menor impedancia tiene por medio de su red para llegar a la terminal; para facilitar su interpretación, se dejaron los colores por cada red.

Los tiempos mínimos de viaje para cada unidad de análisis se representan cartográficamente mediante vínculos espaciales. Cabe anotar que, para obtener estimaciones para la accesibilidad geográfica, se acogieron todos los datos sin discriminar las ZAT's que estaban muy distantes a las redes, más bien, se castigan con la impedancia generada por la fricción de distancia, la cual influye en la segmentación poblacional creando una barrera social en el territorio. En la figura 12, se evidencia la distribución de los tiempos mínimos de viaje de cada unidad de análisis a la terminal Cañaveralejo, categorizados por el tiempo y el modo usado.

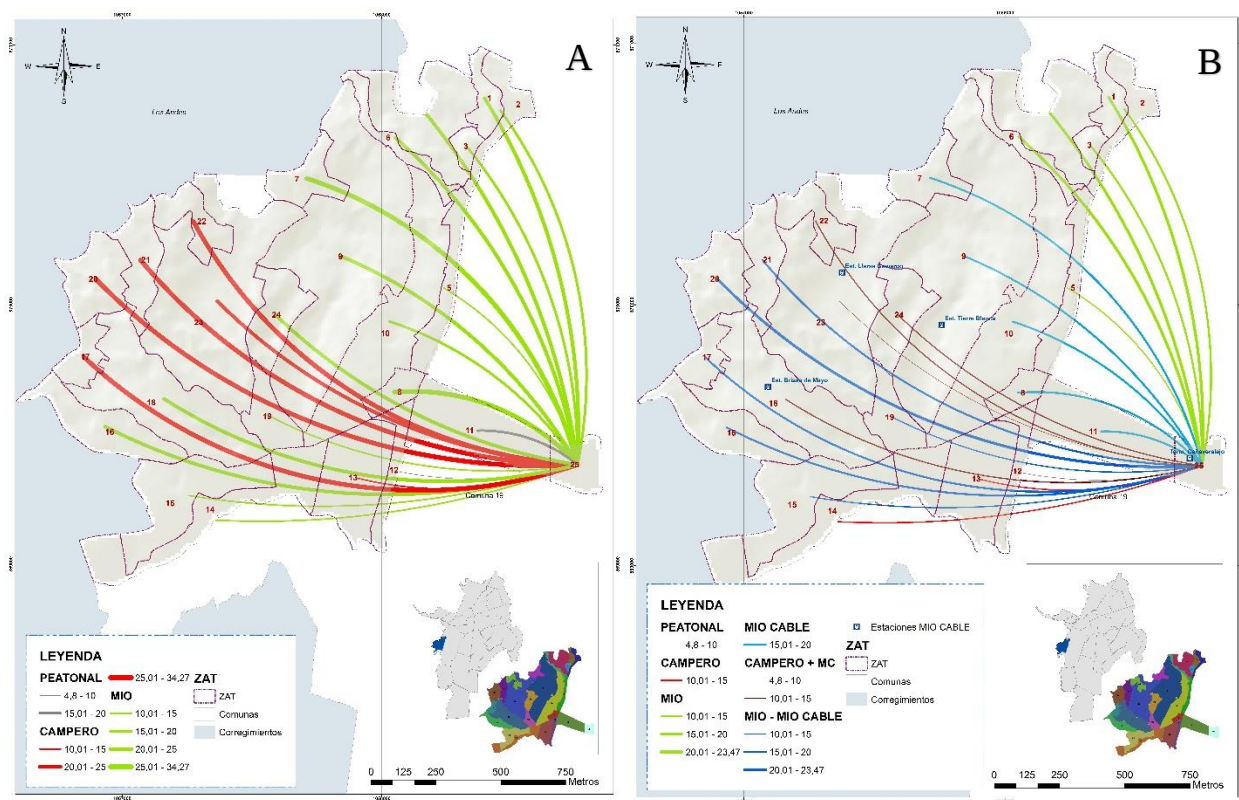


Figura 12. Distribución de TMV en minutos según el modo hasta la terminal Cañaveralejo. A: Escenario 1 – 2014, B: Escenario 2 - 2019

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La implementación del sistema de transporte por cable, facilita la integración con la terminal Cañaveralejo, minimizando la impedancia en algunas unidades de análisis ubicadas en la parte alta de la ladera de hasta 17 minutos. Es evidente la reducción en tiempos de viaje,

especialmente en las zonas donde la superficie vial no es apta para el acceso de vehículos de transporte público.

Los tiempos mínimos de viaje calculados según las matrices OD, muestran un gran impacto generado por el STC MIO CABLE para las ZAT ubicadas en las áreas de influencia de las estaciones, con reducciones desde un 40% hasta en un 62% respecto al primer escenario en las unidades de análisis 9, 18, 21, 22 y 23.

Para el cálculo de esta variable ligada a la accesibilidad territorial urbana, que en este estudio se definió como el trayecto mínimo por cada sistema de transporte, analizado independientemente desde su centroide hasta la terminal Cañaveralejo, es necesario precisar que fueron agregados datos de las trayectorias peatonales promedio desde cada ZAT hasta la infraestructura del sistema analizado, así mismo, se adicionó una constante de tiempo agregado, definida por la rata de espera de cada sistema según los parámetros operacionales, con el objeto de que el modelo de accesibilidad geográfica tuviese en cuenta todos los parámetros de cada modo y las posibles integraciones entre los sistemas con el objetivo de precisar la trayectoria mínima.

Se plantearon varios escenarios, de acuerdo a las áreas de cobertura, como por ejemplo la alternativa de escogencia entre el MIO CABLE o alimentador de un usuario que se encuentra en el área de cobertura conjunta, o una cadena de viaje de este modo: trayectoria peatonal + abordaje campero hasta estación MIO CABLE más cercana + trayectoria MIO CABLE hasta la terminal Cañaveralejo. Lo anterior genera un grado de imprecisión al no tener en cuenta la integración tarifaria, logística y física entre sistemas, lo que genera exclusión (CAF & AFD, 2018).

7.2.3 EVALUACIÓN DE LA CONDICIÓN DE ACCESIBILIDAD URBANA

En la planificación del transporte territorial, generalmente se da un enfoque en la distribución de servicios y destinos, la conectividad, los tiempos de viaje y los usos de suelo para determinar el grado de accesibilidad geográfica a una zona determinada (Heinrichs & Bernet, 2014). La accesibilidad espacial, se evalúa en función de la ubicación y distribución de cada una de las actividades y factores que conforman un sistema de transporte; su enfoque principal es la proximidad para acceder a la red de transporte, la densificación de la misma y la cobertura espacial de cada una de ellas (Bhat, y otros, 2000), (University College London & Universidad de los Andes, 2013).

Con relación a lo anterior, se evalúa la condición de accesibilidad urbana mediante diversos indicadores agrupados en tres enfoques que provean información de la calidad, eficiencia, eficacia y efectividad de los servicios ofertados por los sistemas de transporte respecto a la demanda de viajes en el área de estudio. A continuación, se exponen los resultados del cálculo de indicadores por cada enfoque evaluado; los datos resultantes fueron normalizados mediante la ecuación 20, con el objetivo de poder comparar los datos bajo una misma escala. Los únicos indicadores que no se normalizaron fueron el factor de ruta integral y el índice de trazado velocidad, dado que el rango de datos resultantes no presenta mucha dispersión y debe tener un valor mínimo de 1 para inferir en la calidad de los trazados.

7.2.3.1 *Infraestructura*

Según (Bautista, 2018), (Loyola Gómez, 2005) y (Vivas Pacheco, 2011), en la medida de que la infraestructura de transporte no sea apropiada, no haya integración territorial y el grado de conectividad no sea adecuado, genera una fricción que eleva los costos de desplazamiento aminorando el grado de accesibilidad y reduciendo la movilidad urbana. Desde el enfoque de

infraestructura, es posible determinar la accesibilidad topológica a cada sistema mediante la teoría de grafos utilizando medidas como los indicadores de densidad de infraestructura, puesto que, tal y como lo plantean (Cardozo, Gómez, & Parras, 2009) y (Lerma, 2017), esta medida provee información cuantitativa de la red de transporte distribuida espacialmente por el área de estudio. En el primer enfoque se evalúa el grado de conexión de las redes y su estructura topológica; según (Loyola Gómez, 2005), la infraestructura, al ser un sistema cerrado provee condiciones para calcular accesibilidad relativa de los nodos a los centros de actividad, teniendo en cuenta la geometría de la red. Las medidas usadas en este enfoque como la densidad de rutas e intersecciones, paradas y conectividad, son indicadores potenciales que establecen una configuración e intersección y la relacionan con la capacidad de acceso a las zonas (Jara & Carrasco, 2009), (Bhat, y otros, 2000).

En la tabla 21 se exponen los resultados del indicador de densidad de Kansky para evaluar el grado de coherencia y cohesión de las redes.

Tabla 21. Indicador de Kansky

<i>PARÁMETRO</i>	<i>Camperos 2014</i>	<i>Camperos 2019</i>	<i>MIO (2014)</i>	<i>MIO + MIO CABLE (2019)</i>
<i>BETA</i>	1,85	1,74	1,77	2,07
<i>GAMMA</i>	0,69	0,65	0,70	0,81
<i>ALFA</i>	0,49	0,42	0,48	0,65

Fuente: Elaboración propia, 2019.

El análisis realizado en ambos escenarios, muestra mejores resultados para el sistema de camperos en el primer escenario, la conexión de los nodos, la cohesión de los arcos y la complejidad de la red presentan valores más altos en el primer escenario; en contraste, el sistema de STM presenta una mayor conectividad en el segundo escenario, con valores de conexión,

cohesión y complejidad más altos respecto al primero, lo cual se debe a la implementación del MIO CABLE, la cual genera un valor agregado de arcos y nodos a las ZAT en las que incide este sistema.

En las figuras 13 y 14 se evidencia la densidad de infraestructura vial ponderada por cada red analizada.

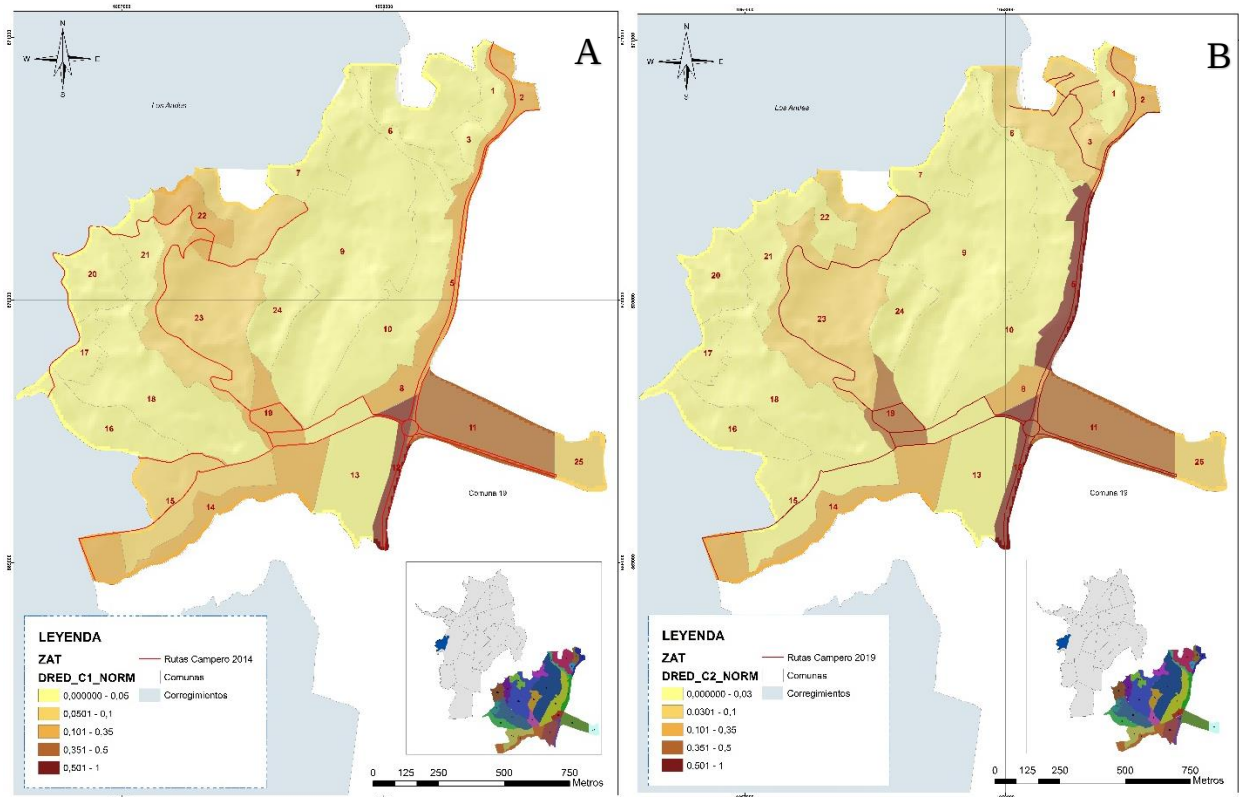


Figura 13. Densidad de infraestructura vial de la red de camperos. A: Escenario 1 – 2014, B: Escenario 2 - 2019

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la figura 14 se presenta la distribución de la red de STM, la cual es la misma para ambos escenarios dado que la red de alimentadores no cambia, solo se aprecia un conjunto de valores de densidad.

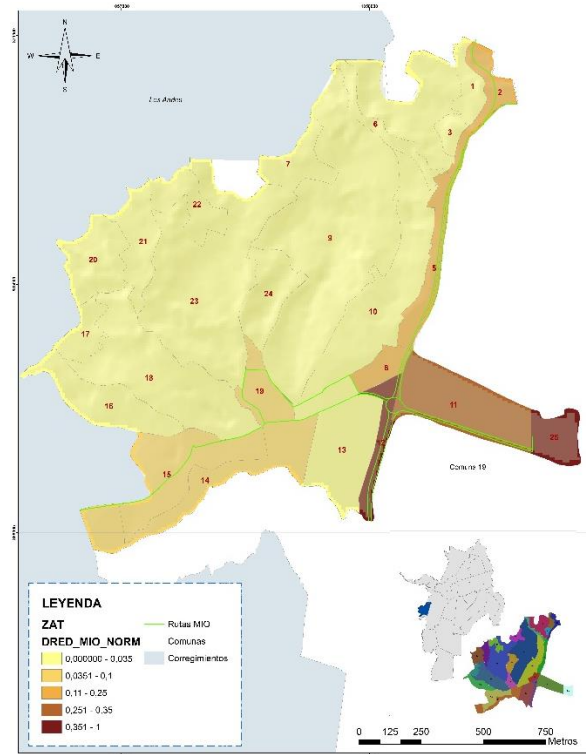


Figura 14. Densidad de infraestructura vial de la red de alimentadores

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Para su mejor comprensión, la distribución de la densidad se visualiza por medio de quintiles; la ponderación del indicador se ajusta a la distribución de la red, se arrojan valores positivos en las unidades de análisis que confluyen varias rutas de las redes, y que están más cercanas a la terminal Cañaveralejo como las unidades 5, 8, 11, y 12. La densidad de red vial de camperos presenta sólo seis ZAT con valores altos, para cada escenario; cabe aclarar que no son las mismas unidades debido a la omisión de rutas que a la fecha no están funcionando y otras para las cuales no se tenía información en el primer escenario, por ejemplo la unidad 4 perteneciente al barrio Belén, fue la más beneficiada en la comparación de escenarios, mientras que las unidades 20 y 17, se vieron afectadas negativamente al eliminar la ruta de la sultana.

Para la red de alimentadores, que es la misma en ambos escenarios, se establece que las ZAT que presentan mayores niveles de pendiente y menor acceso vial son las más afectadas, pues

la distribución de las rutas de Metrocali, se efectúa en las zonas donde la pendiente permite un flujo con menor impedancia.

La ponderación de este indicador influye directamente en la calidad y fiabilidad de los resultados, por ejemplo, en su investigación, (Huertas Rodríguez & Serrano Florez , 2017), se pondera la densidad de acuerdo a las rutas por tramo y la capacidad de los vehículos, permitiendo estimar este indicador con variables propias de los modos involucrados. De igual forma para esta investigación, se ponderó el indicador de densidad respecto al número de rutas disponibles por cada modo en cada tramo y se multiplicó por un factor de peso sumado al número de paradas disponibles. El factor de peso fue definido por la relación entre la capacidad de cada modo dividido la capacidad mínima del total de modos, con el objeto de que los valores no tuviesen mucha dispersión. La ponderación aportó buenos resultados en este estudio, siendo coherentes con la distribución de las redes por las unidades de análisis, sin embargo, es de aclarar que los valores de densidad se vieron afectados cuando las redes se encuentran en condición limitando algunas unidades de análisis o ZAT's

Para la evaluación de indicadores como el factor de ruta integral y el índice de trazado velocidad en ambos escenarios, es necesario enfatizar que la manera en la que se definan y calculen las matrices OD, definen la calidad de los datos y por supuesto, los valores de accesibilidad generados por estos indicadores. Estos indicadores son similares en su formulación, se basan en el cómputo de matrices OD y sus recorridos, el factor de ruta evalúa el grado de aproximación de una red a un trayecto ideal, que se define como una línea recta entre dos puntos, basado en distancias, mientras que el índice de trazado-velocidad se basa en los tiempos de recorrido; para ambos indicadores, el valor de 1 significa que la red tiene una efectividad (F.R.) y eficiencia (ITV) del 100%, lo cual es algo utópico al evaluar en superficies viales. En esta investigación se

realizaron más de 10 matrices y vectores que permitieron establecer correctamente los recorridos desde y hacia cada ZAT, teniendo en cuenta todos los sistemas de transporte, lo cual generó una gran cantidad de información que fue organizada en tablas de Excel para facilitar su interpretación.

En las figuras 15 y 16 se aprecian los resultados de este indicador para cada escenario; los valores de Factor de ruta en las zonas declaradas como inaccesibles por el sistema (alejadas a una distancia mayor de 300 metros), se asignó un valor de 0.

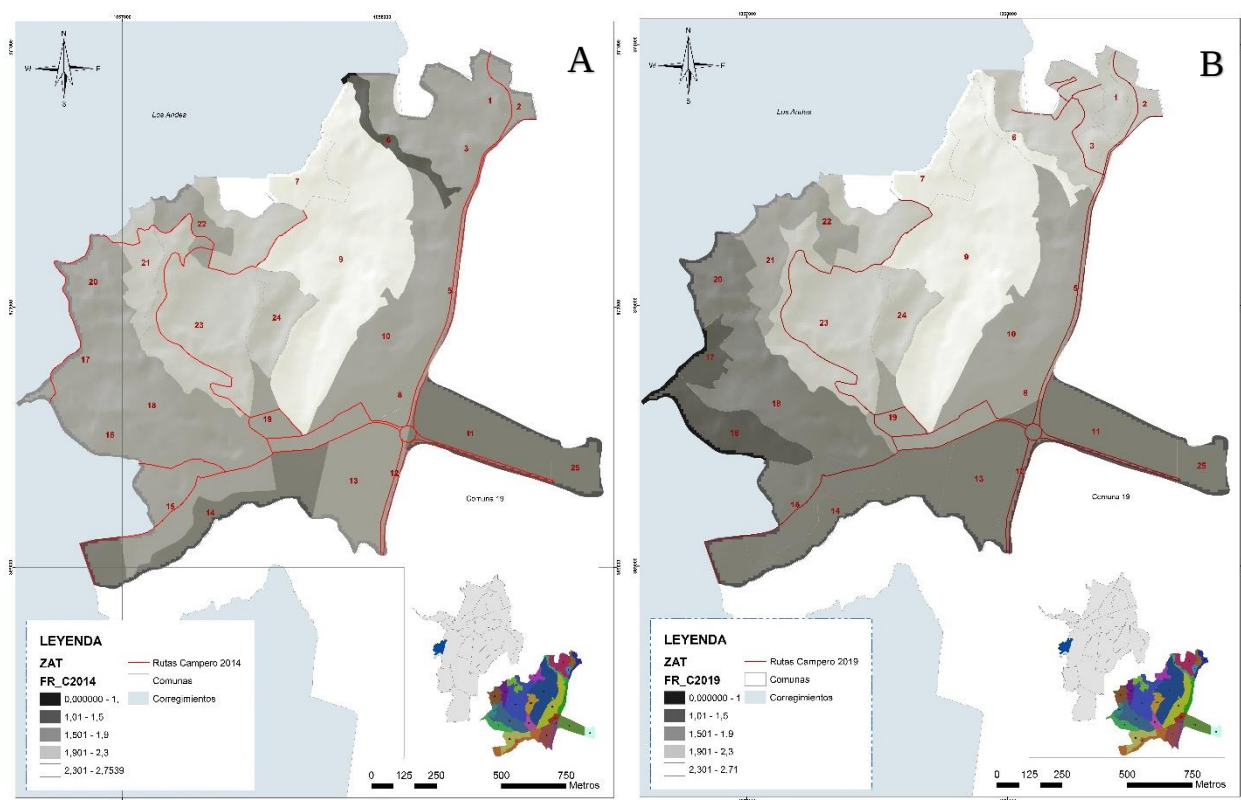


Figura 15. Factor de ruta integral para la red de camperos. A: Escenario 1 – 2014, B: Escenario 2 - 2019

Fuente: Elaboración propia, 2019

Se puede apreciar que las unidades de análisis en color gris oscuros presentan valores del indicador en 0, debido a la carencia de las redes en dichas zonas; así mismo, los colores claros reflejan un valor alto del indicador, evidenciando la ineficiencia de las redes en las ZAT's.

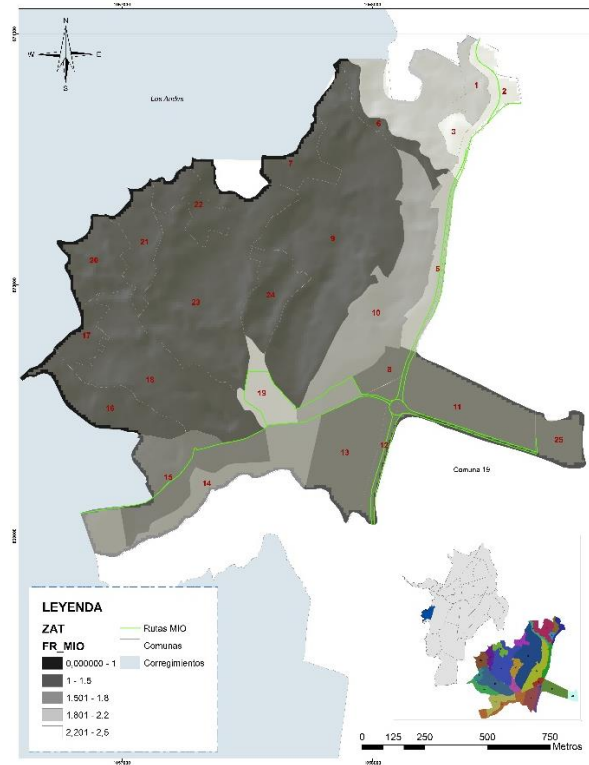


Figura 16. Factor de ruta integral para la red de alimentador

Fuente: Elaboración propia, 2019

7.2.3.2 Servicio y operación

Los parámetros operacionales de cada sistema de transporte, algunas variables sociales y las matrices y vectores OD generados en pasos anteriores, son el insumo principal para el cálculo de medidas agregadas y desagregadas que permitan evaluar en términos de calidad del servicio ofertado, los sistemas de transporte que inciden en el área de estudio.

En las figuras 17 y 18 se exponen los resultados para el índice de trazado velocidad; al ser una derivación de la medida de factor de ruta integral, tienen una estructura similar, sin embargo, los parámetros evaluados no se basan en distancias sino, en tiempo. Por tal motivo, al igual que el indicador de factor de ruta, se omitieron las zonas de análisis que estuviesen a una distancia mayor de 300 metros de las redes, asignando un valor de 0 y asumiendo que dichas unidades no cuentan con acceso óptimo a los sistemas.

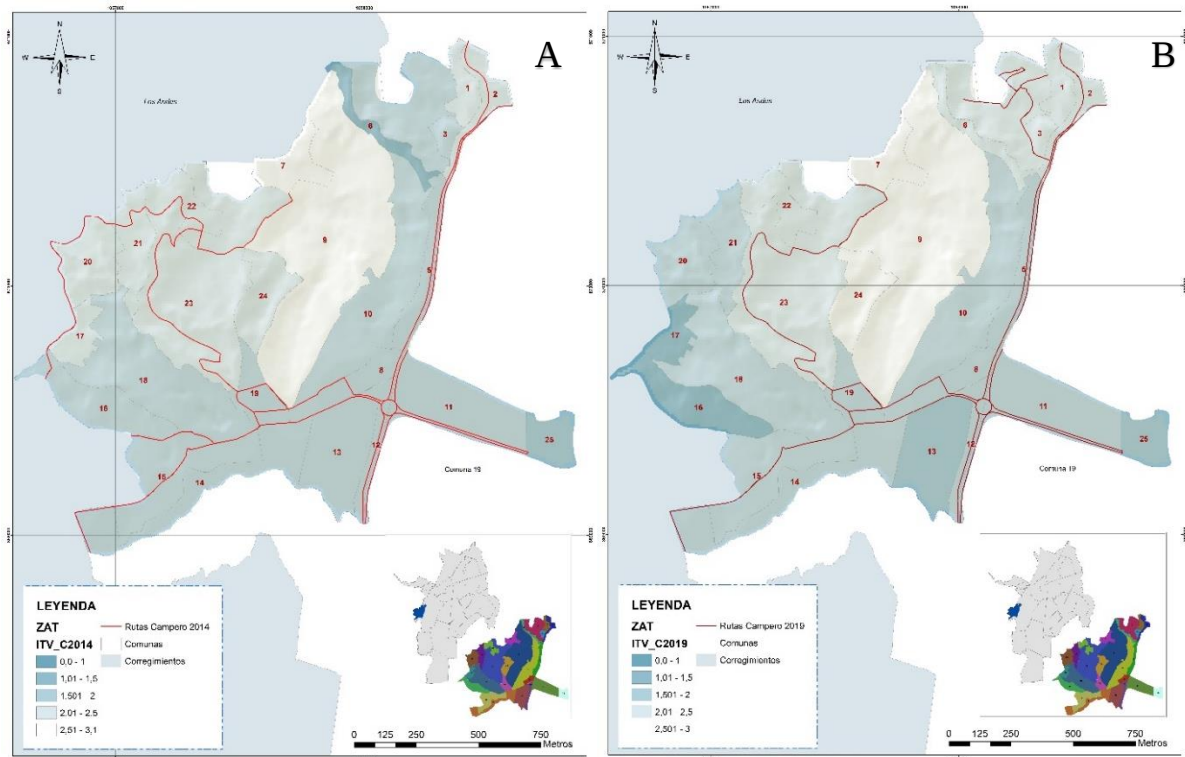


Figura 17. Índice de trazado-velocidad para la red de camperos. A: Escenario 1 – 2014, B: Escenario 2 - 2019
Fuente: Elaboración propia, 2019.

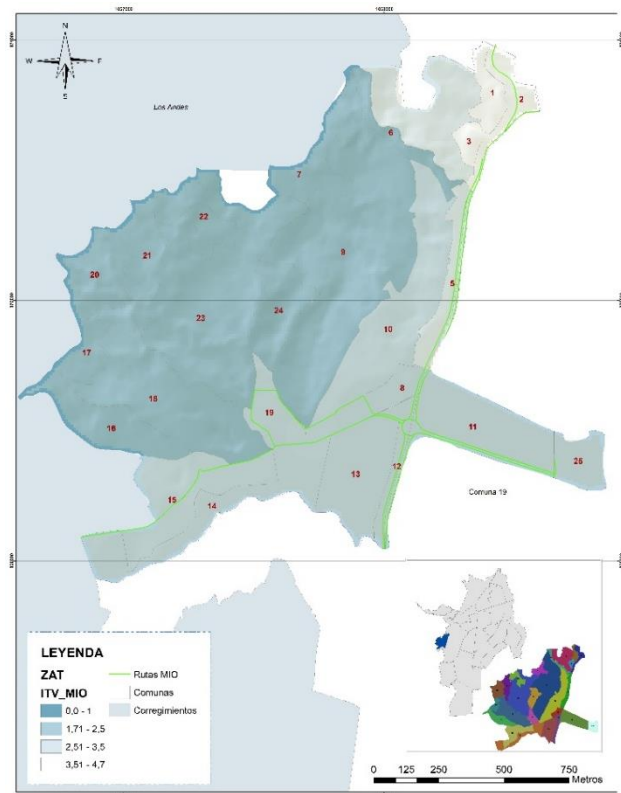


Figura 18. Índice de trazado-velocidad para la red de alimentador
Fuente: Elaboración propia, 2019

Al igual que el indicador de factor de ruta, el ITV generó unos datos erróneos en algunas unidades al usar las matrices OD sin tener en cuenta las caminatas, lo que hizo necesario un reproceso con la conformación de nuevas matrices teniendo en cuenta los trayectos peatonales y evitar las imprecisiones suscitadas.

Tanto para el indicador de FR y el de ITV para todos los sistemas de transporte evaluados en este estudio, parten de la base de que las unidades de análisis o ZAT, las cuales tengan su centroide a una distancia mayor de 300 metros de la infraestructura del sistema, se omitía su cálculo, con el fin de generar el menor grado de imprecisión en los resultados de indicadores. De tal manera que para la red de camperos se excluyeron: una ZAT para el 2014 y dos para el 2019, y para el sistema de alimentadores se excluyeron 11 ZAT, dado el área de influencia de la red. Los valores del FR e ITV para el sistema de camperos en la evaluación de escenarios presentan cambios significativos en las ZAT: 4, 6, 16, 17, 20 y 21, debido a la condición de presencia y ausencia de rutas. Generalmente los indicadores muestran tendencias decrecientes, es decir, cambios positivos, en las unidades de análisis centrales de la zona de estudio y en la parte Norte debido a la integración de la ruta Belén; recordando que entre mayor sea el valor de los indicadores, menor es la calidad del trazado. Para el sistema de alimentadores, los valores de FR e ITV, tienen un grado de aproximación a 1, es decir buena calidad, en zonas cercanas hacia la terminal Cañaveralejo como la 8, 11, 12, 13, 15 y 25 por supuesto, al ser el punto de confluencia de las rutas.

Estos indicadores proveen información respecto al grado de eficiencia y efectividad de las redes en el área de estudio, no pueden ser comparados con los estudios realizados por (Murillo Hoyos, 2007) o (Monsalve Téllez & Piedrahita Quintero, 2017), debido al contexto de análisis, para los estudios anteriores, la escala de investigación es a nivel regional, mientras que para el presente estudio es un análisis a detalle a nivel de comuna, por tal motivo el comportamiento de

indicadores se ve afectado por las distancias cortas, las velocidades ponderadas de acuerdo con la pendiente, entre otros factores que pueden influenciar en el grado de precisión de los indicadores.

Posteriormente, fue calculado el índice de provisión de transporte público para cada ámbito en ambos escenarios, se optó por desestimar los valores resultantes para los días no hábiles, dado que no presentaba variación significativa que pudiese analizarse con detalle. En la figura 19 se evidencia el IPTP en día hábil para ambos escenarios de evaluación.

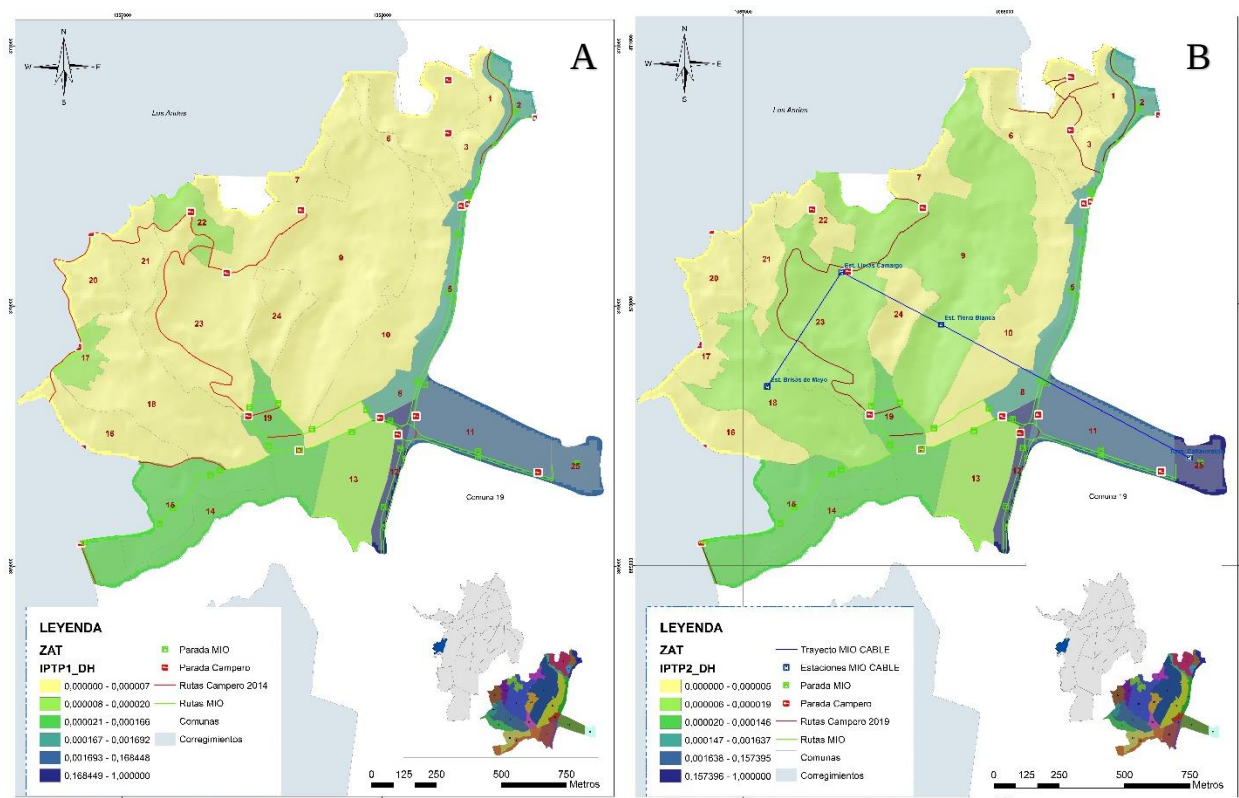


Figura 19. Índice de provisión de transporte público. A: Escenario 1 – 2014, B: Escenario 2: 2019

Fuente: Elaboración propia

En los resultados se evidencia que, pese a la normalización de los datos, existe mucha desviación en algunos datos de ZAT's, lo cual puede explicarse en la falencia del cálculo para las unidades de análisis que no tienen paradas, pero si rutas, lo que genera un grado de dispersión e imprecisión en los resultados. Por el contrario, los resultados exponen que la implementación del sistema de transporte MIO CABLE mejoró levemente la condición en las zonas aledañas a las

estaciones (9, 23 y 18), las unidades 11, 12 y 25 presentan los mejores niveles de accesibilidad debido a la oferta integral de los sistemas de transporte. La distribución espacial del indicador se realizó mediante quintiles para facilitar su interpretación. Por otro lado, las unidades de análisis 17 y 20, disminuyeron su condición de accesibilidad, debido a la omisión de la ruta de camperos la sultana que funcionaba para el primer escenario.

El cálculo del índice de provisión del transporte público inicialmente se pensó realizar detallado para calcular una accesibilidad dinámica usando dos ámbitos (día hábil y día no hábil) para ambos escenarios, sin embargo, los cálculos realizados en días no hábiles fueron omitidos en los análisis debido a que la variación del indicador es casi nula y no interfiere en la condición de accesibilidad, para precisar su calidad se necesita más desglose de información por horas pico y horas valle. Este indicador permite caracterizar la oferta de los sistemas de transporte teniendo en cuenta la infraestructura de paradas, los parámetros operacionales y la población de cada unidad de análisis; en ese sentido, se recalca que para las zonas de análisis 7, 8, 11, 12 los cuales tienen actividades económicas distintas a la residencial y por tanto no tienen población, se calculó el índice relativo, omitiendo el dato demográfico.

Los resultados de este indicador muestran una tendencia creciente hacia las unidades que cuentan con algún tipo de infraestructura, por ejemplo, las estaciones de MIO CABLE en las ZAT's 18, 19 y 23, mientras que el valor disminuye considerablemente para las unidades por donde pasaba la ruta de la sultana en el primer escenario (16, 17, 20, 21 y 22). La distribución espacial de los datos fue evaluada por los diagramas de dispersión, en donde es evidente que la concentración de los datos se encuentra en valores cercanos a 0, lo que se debe a la ponderación de los parámetros operacionales debido a la ausencia de paradas de campero descritas en el apartado metodológico. Pese a que las redes del sistema presentan buena densidad en las unidades

de análisis que se benefician directamente de él, este tipo de transporte opera bajo parámetros operacionales distintos de acuerdo a su zona de influencia; en toda el área de estudio operan 6 rutas de las cuales dos son exclusivas del a Comuna 20 teniendo puntos de confluencia o terminales en 3 puntos del área de estudio; en el Sector de El Palo, ubicado en la glorieta de la Calle 1 con Carrera 52, en el barrio Belén y en el parqueadero contiguo a la terminal de Cañaveralejo; las demás rutas son transitorias por la zona de estudio con terminales en La Sirena, Los Chorros y el centro de la ciudad.

Estos tres únicos puntos de confluencia se pueden adoptar como paradas, pero resultan insuficientes para el cálculo de indicadores como el IPTP que requerían este tipo de parámetro, por tanto, se definieron las pseudo-paradas o paradas teóricas, pero para la estimación del IPTP generó imprecisiones y mucha dispersión, afectando directamente los valores en unidades de análisis que cuentan con infraestructura vial pero no con paraderos. Con relación a lo anterior, la definición de las paradas teóricas debió tener una mejor uniformidad, como lo planteó en su estudio (Bravo Serna & Hurtado Urrea, 2016), el cual definió las paradas teóricas de acuerdo a una separación promedio a lo largo de los tramos, lo que generó datos más homogéneos para el IPTP.

7.2.3.3 Cobertura

El análisis de las condiciones de acceso, conectividad y cobertura de la red de transporte, en el presente estudio, permite inferir en la condición de participación de la población relacionada con la movilidad; apoyándose en el planteamiento hecho por autores como (Kenyon , Rafferty, & Lyons, 2003), afirmando que la evaluación de la efectividad en el sistema de transporte provee información relevante para dimensionar la participación de la comunidad y el nivel de accesibilidad.

En las tablas 22 y 23 se resume el análisis de cobertura a población por los modos de transporte en ambos escenarios de estudio, realizado con las áreas de influencia de cada red para un vector de 24x1 hacia la terminal Cañaveralejo.

Tabla 22. Análisis de cobertura de población escenario 1

ZAT	POBLACIÓN POTENCIAL 2014	CAMPERO		ALIMENTADOR		POBLACIÓN TOTAL SIN COBERTURA
		POBLACIÓN CUBIERTA	% COBERTURA	POBLACIÓN CUBIERTA	% COBERTURA	
1	728	728	100,0%	728	100,0%	0
2	379	379	99,9%	379	99,9%	0
3	557	557	100,0%	557	100,0%	0
4	2834	1443	50,9%	1552	54,8%	1282
5	465	465	100,0%	465	100,0%	0
6	756	169	22,3%	320	42,4%	436
7	390	205	52,7%	0	0,0%	185
8	632	632	100,0%	632	100,0%	0
9	10261	3841	37,4%	4789	46,7%	5472
10	5849	5626	96,2%	5849	100,0%	0
11			N.A.			
12			N.A.			
13	3029	3029	100,0%	3029	100,0%	0
14	1095	1095	100,0%	1095	100,0%	0
15	1773	1773	100,0%	1773	100,0%	0
16	2500	2500	100,0%	1001	40,0%	0
17	1685	1685	100,0%	0	0,0%	0
18	8631	8631	100,0%	4825	55,9%	0
19	1261	1261	100,0%	1261	100,0%	0
20	1859	1859	100,0%	0	0,0%	0
21	1252	1252	100,0%	0	0,0%	0
22	1315	1315	100,0%	0	0,0%	0
23	8900	8900	100,0%	2268	25,5%	0
24	2107	1577	74,8%	1096	52,0%	530
	58258	TOTAL POBLACIÓN				7905
		PORCENTAJE POBLACIÓN POTENCIAL SIN COBERTURA = 13.6%				

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Las unidades de análisis número 10 y 11 no presentan datos para esta estimación debido a que su actividad económica no corresponde para un uso de suelo residencial, por consiguiente, no

se realizó estimación demográfica para esas ZAT's. El área de influencia del MIO CABLE se estimó en conjunto con la red de alimentadores, dado que ambos hacen parte del sistema de transporte masivo y el usuario no tiene recargo monetario adicional si hace uso de ambos modos.

Tabla 23. Análisis de cobertura población escenario 2

ZAT	POBLACIÓN POTENCIAL 2019	CAMPERO		ALIMENTADOR + MIO CABLE		POBLACIÓN TOTAL SIN COBERTURA
		POBLACIÓN CUBIERTA	% COBERTURA	POBLACIÓN CUBIERTA	% COBERTURA	
1	703	703	100,0%	703	100,0%	0
2	366	366	99,9%	366	99,9%	0
3	538	538	100,0%	538	100,0%	0
4	2736	2707	98,9%	1499	54,8%	29
5	463	463	99,9%	463	99,9%	0
6	752	609	81,0%	319	42,4%	143
7	388	204	52,7%	0	0,0%	184
8	629	629	100,0%	629	100,0%	0
9	10211	4078	39,9%	7063	69,2%	3148
10	5820	5598	96,2%	5820	100,0%	0
11				N.A.		
12				N.A.		
13	2981	2981	100,0%	2981	100,0%	0
14	1168	1168	100,0%	1168	100,0%	0
15	1890	1890	100,0%	1890	100,0%	0
16	2714	357	13,2%	2240	82,5%	474
17	1900	0	0,0%	1726	90,8%	174
18	9729	5022	51,6%	9729	100,0%	0
19	1328	1328	100,0%	1328	100,0%	0
20	2176	0	0,0%	0	0,0%	2176
21	1465	1297	88,5%	589	40,2%	168
22	1272	992	78,0%	730	57,4%	280
23	8607	8367	97,2%	8367	97,2%	240
24	1944	1455	74,9%	1944	100,0%	0
59780		TOTAL, POBLACIÓN				7015
PORCENTAJE POBLACIÓN POTENCIAL SIN COBERTURA = 11.7%						

Fuente: Elaboración propia, 2019

Es de resaltar que las estimaciones poblacionales usadas no son datos demográficos oficiales, por tal motivo el resultado del análisis de cobertura puede resultar algo impreciso

respecto a la situación actual en el área de estudio. Las áreas de influencia de los sistemas de transporte, fueron calculadas por un factor de impedancia definido por el tiempo de viaje accesible de un usuario desde y hacia la infraestructura de cada modo. Estas áreas no son regulares debido a que la impedancia depende de los tramos viales recorridos, los cuales están ponderados de acuerdo a la pendiente media del mismo, lo que genera un grado de precisión más acertado a la hora de calcular las áreas de servicio. Los resultados de la comparación entre ambos escenarios evidencian que pese a que la implementación del MIO CABLE mejoró sustancialmente el acceso en algunas zonas que carecían de oferta de transporte, el impacto en la integralidad de los sistemas para la cobertura del área de estudio solo se redujo en dos puntos porcentuales.

El análisis desde este enfoque, permite estimar los impactos generados por la implementación del MIO CABLE y su relación con la exclusión social. De este modo es posible inferir, según los datos producidos, que si bien, el área de cobertura, específicamente del STM (Alimentador + MIO Cable) aumenta considerablemente en el segundo escenario abarcando una mayor cantidad de población en unidades de análisis como por ejemplo la 9 y la 24; el total de población cubierta en el segundo escenario por los sistemas de transporte público aumenta solamente en 890 usuarios, que es una cifra bastante baja para el total de población que no tiene cobertura (7015). La comparación de escenarios arrojó un resultado de la reducción de población sin cobertura de transporte público, de tan solo 2 puntos porcentuales algo muy poco para la cantidad de usuarios de la zona de estudio. Ahora bien, se precisa que en el cómputo de esta cifra influye sustancialmente la eliminación de la ruta de la sultana que prestaba servicios en los barrios de pueblo joven y de la sultana, así mismo, de la imprecisión de las proyecciones de los datos demográficos los cuales no reflejan la situación actual de la Comuna.

En términos generales, el impacto en términos de cobertura y tiempos de viaje del STC MIO CABLE fue en gran medida positivo, mejorando la conectividad de los usuarios residentes en zonas de carencia de transporte público con el STM; por su parte la mayoría de autores de la literatura coinciden en que el STC de Medellín mejoró sustancialmente los tiempos de movilidad desde y hacia las zonas de ladera, garantizando la participación de la comunidad residente en los servicios ofertados en distintas partes de la Ciudad, al integrarse con el sistema de transporte masivo (Bocarejo & Velásquez, 2012), (Brand & Dávila, 2011), (Heinrichs & Bernet, 2014), entre otros.

Posteriormente fue estimado el indicador de gravedad en el segundo escenario, teniendo en cuenta la cantidad de viajes producidos en las dos unidades territoriales de análisis de movilidad (UTAM), del estudio realizado por parte de Metrocali (Steer Davies Gleave, 2015) y a las ZAT que convergen en cada estación. En la Tabla 24 se relacionan los parámetros necesarios para el cálculo de este indicador.

Tabla 24. Parámetros para indicador de gravedad

<i>ESTACIÓN</i>	<i>ZAT's cubiertas</i>	<i>% Cobertura de población según área</i>	<i>Viajes MIO según encuesta OD</i>	<i>Viajes potencialmente atraídos</i>
1. Brisas de Mayo	4	40,88%	2528	8816
2. Tierra Blanca	3	31,04%	1920	
3. Lleras Camargo	3	28,08%	1736	
4. Cañaveralejo	24	100%	15460	22040

Fuente: Elaboración propia a partir de (Steer Davies Gleave, 2015).

La adaptación de los viajes generados en la zona de estudio según la encuesta de Metrocali, a las unidades de análisis fueron estimados de acuerdo al área y población potencial de cada ZAT, con el fin de definir los viajes atraídos por cada estación del sistema respecto a su ubicación geográfica. Con base en lo anterior, se generaron valores de potencial atracción de cada estación

y terminal de MIO CABLE en el segundo escenario. En la figura 20 se evidencia el Raster de potencial de atracción generado.

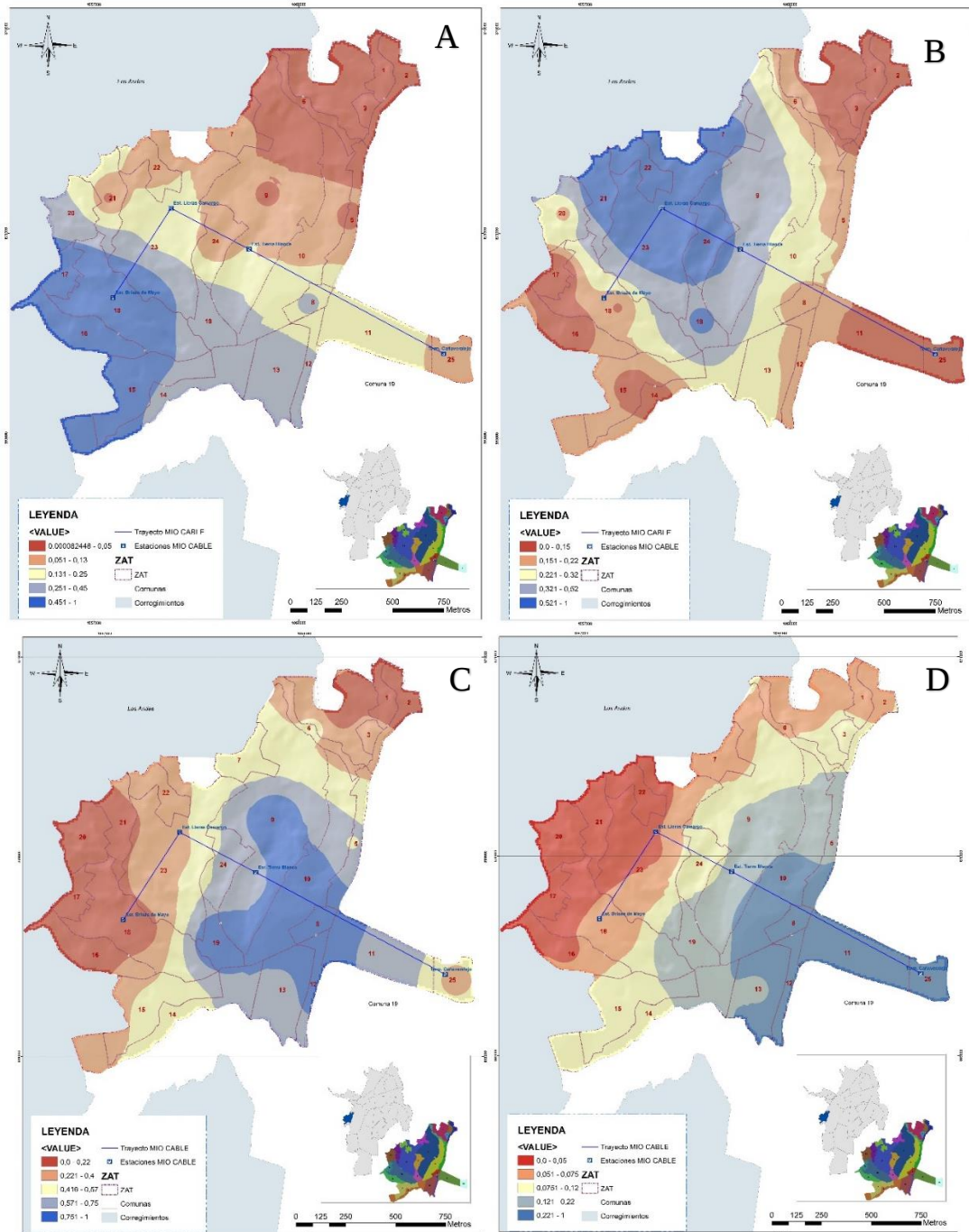


Figura 20. Indicador de gravedad. A: Estación 1 - Brisas de Mayo, B: Estación 2 - Lleras Camargo, C: Estación 3 - Tierra Blanca, D: Estación 4 - Terminal Cañavalejo.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La distribución espacial de la interpolación del indicador fue realizada mediante quintiles en 5 clases que permita apreciar mejor la distribución de los datos. Es evidente que las unidades de análisis más lejanas a las estaciones, presentan un menor potencial de atracción; sin embargo, en algunas zonas no tan lejanas se observan valores bajos de atracción debido al factor de ponderación del indicador.

El potencial de atracción poblacional de las estaciones resultante, indica que la configuración topográfica influye directamente en el factor de impedancia requerido en los cálculos; se evidencia que la estación de mayor atracción es la estación Tierra Blanca, su ubicación estratégica de acuerdo a la concentración de población y la centralidad geográfica de la zona de estudio, la posicionan como el punto de mayor atracción de viajes, beneficiando directamente a 5 ZAT's. Por otro lado, la terminal Cañaveralejo tiene el menor potencial de atracción debido a que existe mucha fricción en cuanto a las distancias de desplazamiento peatonal para acceder al sistema, por eso se define como una terminal de integración (Carvajal, 2016).

Autores como (Murillo Hoyos, 2007), (Pacheco Gago, 2003), (Gómez, 2005) coinciden en que los modelos gravitatorios permiten estimar la distribución de la atracción de viajes a puntos específicos teniendo en cuenta un factor de impedancia, sin embargo, este factor define el comportamiento de los resultados, por tal motivo, tiende a tener diversas estimaciones de acuerdo a su definición. Sin embargo, la definición de impedancias para esta investigación por tiempos de desplazamientos, ofreció resultados de buena calidad.

Posteriormente, se procedió a calcular los indicadores que componen el índice de accesibilidad propuesto por (GIRÃO, Pereira, & Fernandes, 2017), para ser normalizados posteriormente. En la tabla 25 se exponen los resultados para cada indicador en cada escenario.

Tabla 25. Resultados indicadores de accesibilidad propuesto por GIRAO

ZAT	INDICADOR 1 NORMALIZADO		INDICADOR 2 NORMALIZADO		INDICADOR 3 NORMALIZADO	
	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2	ESCENARIO 1	ESCENARIO 2
1	1,00	0,70	0,00	0,00	0,024	0,025
2	1,00	0,70	0,74	0,73	0,013	0,013
3	1,00	0,70	0,00	0,00	0,018	0,019
4	0,25	0,46	0,00	0,23	0,094	0,096
5	1,00	0,70	0,84	0,85	0,015	0,016
6	0,12	0,41	0,00	0,00	0,025	0,026
7	0,00	0,20	0,00	0,00	0,004	0,003
8	1,00	0,70	0,33	0,31	0,021	0,022
9	0,17	0,47	0,16	0,41	0,102	0,092
10	0,97	0,72	0,16	0,15	0,194	0,198
11	1,00	0,96	0,67	0,69	0,000	0,000
12	1,00	0,70	1,00	1,00	0,000	0,000
13	1,00	0,70	0,16	0,15	0,100	0,105
14	1,00	0,70	0,67	0,69	0,036	0,041
15	1,00	0,72	0,65	0,61	0,059	0,065
16	0,52	0,46	0,09	0,00	0,025	0,025
17	0,11	0,49	0,09	0,00	0,017	0,017
18	0,67	0,82	0,00	0,26	0,086	0,087
19	1,00	0,78	0,26	0,27	0,013	0,013
20	0,11	0,00	0,09	0,00	0,019	0,019
21	0,11	0,52	0,00	0,00	0,012	0,013
22	0,11	0,69	0,09	0,00	0,013	0,011
23	0,34	0,94	0,35	0,64	0,089	0,077
24	0,45	0,94	0,00	0,00	0,021	0,017
25	1,00	1,00	0,16	0,41	1,000	1,000

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Cabe anotar que para estos cálculos, al igual que el IPTP se evaluó la posibilidad de analizar, según los parámetros operacionales de los modos, la condición de accesibilidad dinámica (teniendo en cuenta horas pico, horas valle, días, hábiles y no hábiles); con el objeto de evaluar la variación en el comportamiento de indicadores de la zona, sin embargo, la variación de estos no

tuvo significancia y fueron desestimados estos cálculos; por consiguiente la evaluación realizada en esta investigación se enfoca en la condición de accesibilidad estática (promedio general).

En la figura 21 se presentan los datos generados para el índice de accesibilidad en el primer escenario; dado al resultado de la distribución de los datos, se presentan los mapas interpolando los valores por las unidades de análisis, haciendo uso de la técnica IDW para una correcta interpolación respecto a la ponderación de distancia entre centroides. Con el objeto de interpretar efectivamente la condición de accesibilidad, la distribución de los datos se realizó por medio de 10 percentiles.

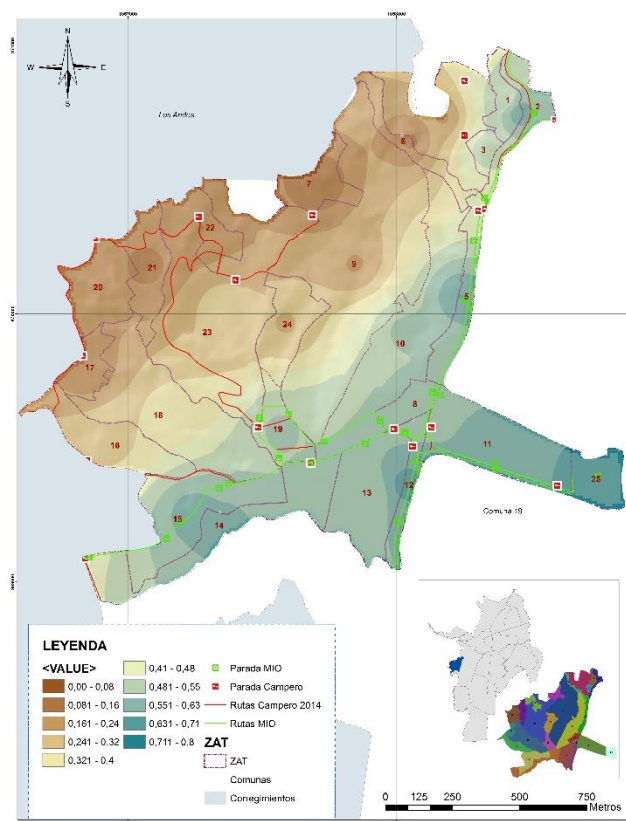


Figura 21. Índice de accesibilidad escenario 1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

El índice de accesibilidad global del primer escenario refleja un patrón de distribución conforme a las curvas de nivel, evidenciando que el acceso a la parte alta de la comuna se afecta

directamente por la configuración topográfica del terreno y la falta de oferta de transporte. En la figura 22 se exponen los resultados del índice de accesibilidad para el segundo escenario.

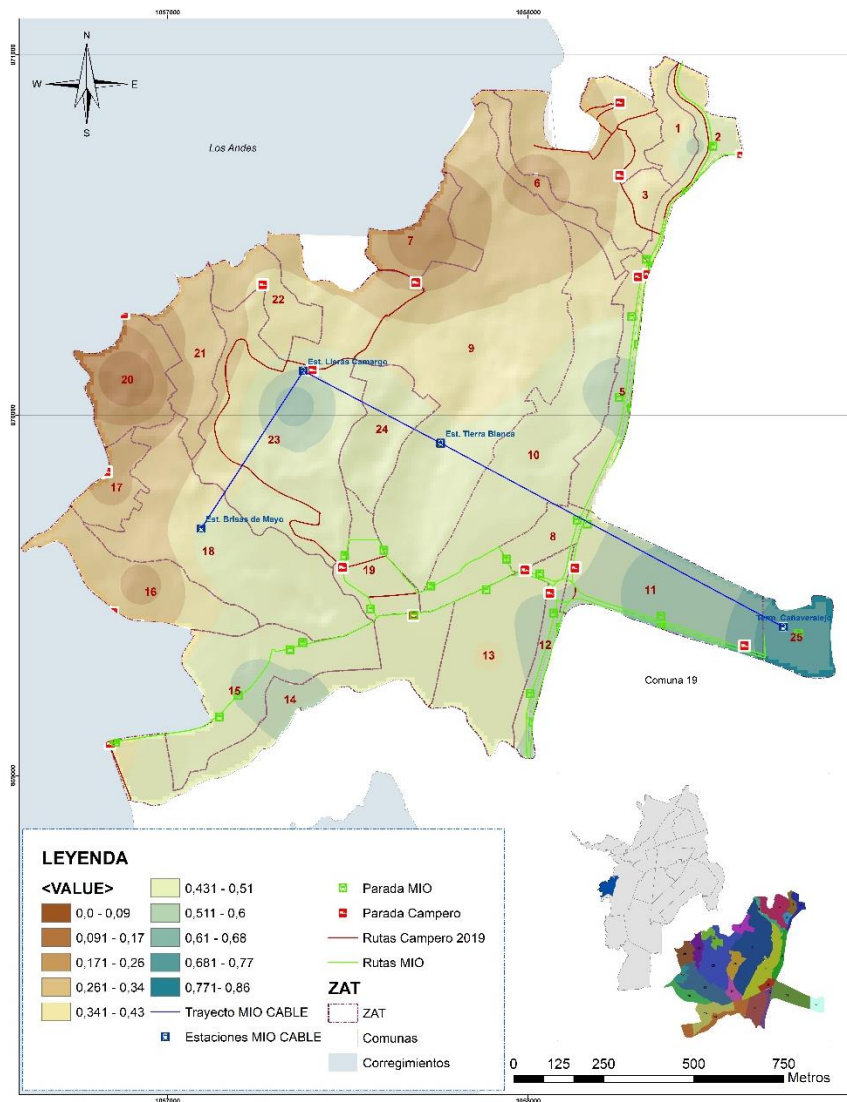


Figura 22. Índice de accesibilidad escenario 2

Fuente: Elaboración propia

La implementación de un sistema de transporte que no necesita superficie vial para ejecutar los desplazamientos y permite una conexión más adecuada de las zonas inaccesibles por vehículos de transporte público motorizados, mejora considerablemente la condición de accesibilidad en dichas zonas de difícil acceso; se evidencia que las unidades de análisis más beneficiadas son las

que abarca el área de influencia del STC, donde se ubican las estaciones. Aunado a lo anterior se ve una tendencia marcada de difícil acceso hacia la zona de alta ladera, lo cual data de una segregación de la población, especialmente la que reside en zonas de asentamiento de desarrollo incompleto o áreas periurbanas.

Según plantea el autor, el índice pese a proveer buenos resultados, tiende a variar su precisión al ser aplicado en otras dinámicas territoriales, y por tanto recomienda ajustar los factores de peso operacionales según el área de estudio. Para efectos de esta investigación, pese a que los factores de peso no fueron modificados presentó resultados acordes con la dinámica de movilidad de la zona de estudio y el impacto generado por el MIO CABLE, dado a que los parámetros son muy similares a los modos usados por el autor, además que, de acuerdo con la información disponible y la limitación de recursos, levantar información más precisa generaba un costo que no se iba a asumir. Sin embargo, para estudios posteriores, resulta interesante evaluar el comportamiento del índice con ajustes ligados a la dinámica territorial de la zona de estudio.

7.3 ANÁLISIS DE RELACIONES

Una vez realizados los cálculos, es posible inferir en las relaciones entre variables, sus comportamientos, patrones generados e impacto social desde el punto de vista geográfico, mediante métodos estadísticos y análisis descriptivo de datos. Inicialmente se realizó un análisis estadístico – descriptivo de algunas variables sociales y operativas de los sistemas, el cual permitió conocer las características de las variables utilizadas en esta investigación, su comportamiento, y relación existente entre ellas. Posteriormente se utilizaron modelos de correlación para evaluar la co-linealidad entre variables.

7.3.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Se tuvo en cuenta 39 variables cuantitativas, algunas como datos originales recolectados y otras como datos generados a partir de estas como los índices. De las 39 variables 37 tienen una muestra de 25 datos recolectados y otras solo cuentan con 7 y 12 datos. Al realizar las pruebas de asimetría se encontró que estas no se ajustan a una distribución normal, es decir que su comportamiento se puede ver representado o modelado por otras distribuciones.

En la figura 23 se presenta un histograma de frecuencias para las poblaciones de las unidades de análisis, el cual indica que no hay asimetría entre las variables.

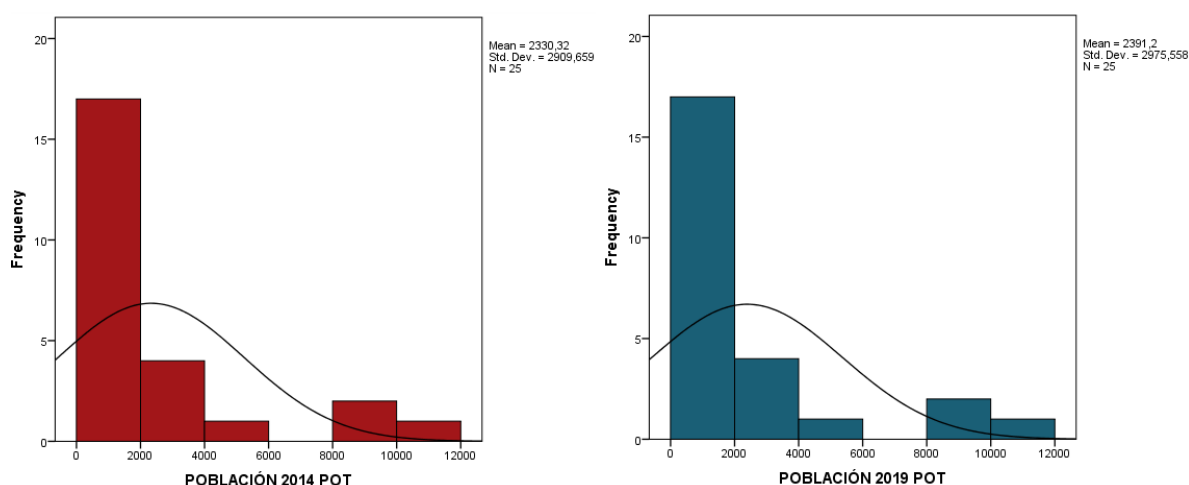


Figura 23. Distribución de población potencial de las ZAT's.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Se evidencia que al menos 17 unidades de análisis cuentan con población potencial menor a 2000 habitantes, mientras que solo una cuenta con una población entre 10000 y 12000 habitantes. La demografía de las ZAT's está directamente relacionada con la superficie, de este modo, una unidad que sea mucho más grande respecto a otras, tiene menos nivel de detalle y por tanto minimiza el grado de precisión en algunos indicadores de accesibilidad como las medidas de densidades.

Algunas de las distribuciones que pueden modelar mejor las variables del estudio son: Gamma, Poisson o binomial; para confirmar esto, habría que realizar otro tipo de análisis que determine si éstas cumplen con sus características y hallar los respectivos parámetros. Por otra parte, en la tabla 26 se refleja el comportamiento y las características de cada variable.

Tabla 26. Tabla resumen estadística descriptiva

	(N tamaño muestra)	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza	Asimetría		Curtosis	
	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Statistic	Std. Error	Statistic	Std. Error
ESTRATO MODA	25	0	3	1,04	,978	,957	,496	,464	-,775	,902
POBLACIÓN 2014 POT	25	0	10261	2330,32	2909,659	8466117,310	1,825	,464	2,346	,902
POBLACIÓN 2019 POT	25	0	10211	2391,20	2975,558	8853942,667	1,827	,464	2,359	,902
DENSIDAD DEMOGRÁFICA	25	0	558	242,24	144,998	21024,357	-0,009	,464	-0,157	,902
DENSIDAD DEMOGRÁFICA 2019	25	0	629	249,68	156,060	24354,810	,314	,464	,492	,902
MI	25	13399	375441	89274,67	85759,271	7354652580,450	2,107	,464	4,713	,902
KM1	25	,01340	,37544	,0892748	,08576004	,007	2,107	,464	4,713	,902
HA\$	25	1	38	8,93	8,576	73,547	2,107	,464	4,713	,902
LONGITUD VIAL KM	25		15	3,13	3,511	12,330	2,356	,464	5,683	,902
DENSIDAD VIAL	25	13	52	34,00	9,748	95,014	-0,419	,464	-0,594	,902
KM/KM2	25	13	52	34,00	9,748	95,014	-0,419	,464	-0,594	,902
D_VIAL NORM. KM/KM2	25	0,0000	1,0000	,539395	,2555680	,065	-,419	,464	-,594	,902
No. MANZANAS	25	1	106	20,76	27,597	761,607	2,106	,464	4,094	,902
No. PARADAS	25	0	7	2,12	2,108	4,443	,931	,464	-,277	,902
DENSIDAD RED 1	25	0	16	4,28	4,785	22,899	1,031	,464	-0,017	,902
POND. KM/KM2 C14	25	0	16	4,28	4,785	22,899	1,031	,464	-0,017	,902
DENSIDAD RED 2	25	0,0000	21,6114	5,748020	6,7679293	45,805	1,023	,464	-,275	,902
POND. KM/KM2 C19	25	0,0000	21,6114	5,748020	6,7679293	45,805	1,023	,464	-,275	,902
DENSIDAD RED 3	25	0	79	14,97	24,080	579,832	1,740	,464	2,186	,902
POND. KM/KM2 MIO	25	0	79	14,97	24,080	579,832	1,740	,464	2,186	,902
D_RED 1 NORM. KM/KM2 C24	7	0	1	,14	,378	,143	2,646	,794	7,000	1,587
D_RED 2 NORM. KM/KM2 C29	25	0	1	0,27	0,313	0,098	1,023	,464	-0,275	,902
D_RED 3 NORM. KM/KM2 MIO	12	0	1	,08	,289	,083	3,464	,637	12,000	1,232
IPTP DHESCE 1 NORM.	25	0	1	0,05	0,202	0,041	4,640	,464	22,288	,902
IPTP DNHESCE 1 NORM.	25	0	1	,05	,202	,041	4,644	,464	22,312	,902
IPTP DHESCE 2 NORM.	25	0	1	0,08	0,268	0,072	3,232	,464	9,361	,902
IPTP DNHESCE 2 NORM.	25	0	1	,08	,249	,062	3,324	,464	10,227	,902
FR CAMP. 2014	25	0	3	1,70	0,472	0,223	-1,492	,464	7,279	,902
ITV CAMP. 2014	25	0,000	3,097	1,93352	,550466	,303	-1,408	,464	6,106	,902
FR CAMP. 2019	25	0	3	1,63	0,631	0,398	-1,013	,464	2,434	,902
ITV CAMP. 2019	25	0,000	2,938	1,86508	,690908	,477	-1,356	,464	3,016	,902
FR MIO	25	0	2	0,95	0,908	0,825	0,084	,464	-1,661	,902
ITV MIO	25	0,000	4,619	1,42388	1,483170	2,200	,635	,464	-,491	,902
TMV ES CENARIO 1 CAMPERO \$ MINUTO \$	25	0	35	24,21	9,120	83,166	-1,027	,464	0,489	,902
TMV ES CENARIO 1 ALIMENT. MINUTO \$	25	0,0000	36,4028	19,782809	8,5322758	72,800	-,070	,464	-,043	,902
TMV ES CENARIO 2 CAMPERO + MIO CABLE MINUTO \$	25	0	32	17,23	7,360	54,170	0,066	,464	0,109	,902
TMV ES CENARIO 2 ALIMENT. + MIO CABLE MINUTO \$	25	0,0000	23,4685	15,365770	5,0016693	25,017	-,924	,464	2,490	,902
INDICADOR DE GRAVEDAD ESTACIÓN 1 NORMAL	25	0	1	0,23	0,270	0,073	1,755	,464	2,655	,902
INDICADOR DE GRAVEDAD ESTACIÓN 2 NORMAL	25	0,0000	1,0000	,440299	,3169699	,102	,357	,464	-1,043	,902
INDICADOR DE GRAVEDAD ESTACIÓN 3 NORMAL	25	0	1	0,28	0,289	0,083	1,421	,464	1,176	,902
INDICADOR DE GRAVEDAD ESTACIÓN 4 NORMAL	25	0,0000	1,0000	,189903	,2350985	,055	2,589	,464	6,845	,902
INDICE DE ACCESIBILIDAD ES CENARIO 1	25	0	1	0,40	0,266	0,071	-0,129	,464	-1,624	,902
INDICE DE ACCESIBILIDAD ES CENARIO 2	25	0	1	0,42	0,186	0,035	-0,024	,464	0,516	,902

Fuente: Elaboración propia a partir de SPSS, 2019

Se evidencia que al menos 17 unidades de análisis cuentan con población potencial menor a 2000 habitantes, mientras que solo una cuenta con una población entre 10000 y 12000 habitantes. La demografía de las ZAT's está directamente relacionada con la superficie, de este modo, una unidad que sea mucho más grande respecto a otras, tiene menos nivel de detalle y por tanto minimiza el grado de precisión en algunos indicadores de accesibilidad como las medidas de densidades.

En la Figura 24 se aprecia la dispersión y concentración por cada unidad de análisis de: A- el número de paradas, B- Longitud vial en km de camperos para 2014, C- Longitud vial en km de Camperos para 2019 y D- Longitud vial en km de rutas alimentadoras para 2014, a pesar de que todos llegan a un mismo punto, se puede observar que la longitud vial recorrida por los camperos en el 2014 presenta mayor dispersión en sus recorridos con un tramo extenso que se sale del rango normal.

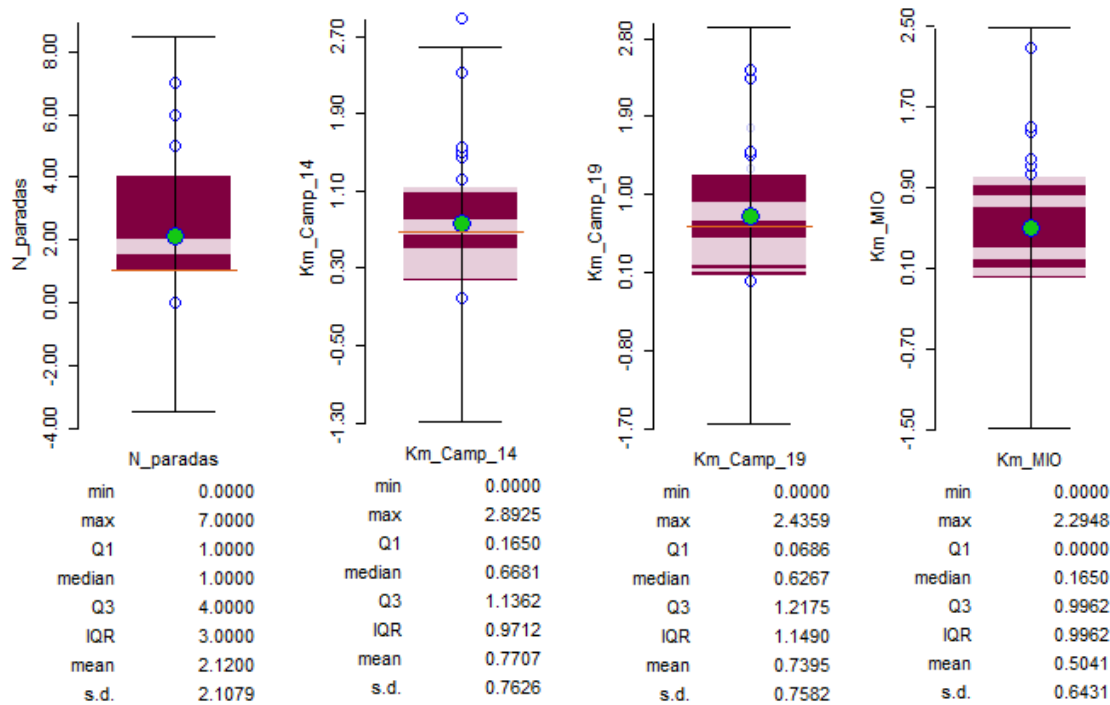


Figura 24. Dispersión de parámetros de redes de transporte
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Comparando la longitud vial 2019 de los camperos con la longitud vial del MIO se encuentra que no existe una alta dispersión entre estas dos variables y su comportamiento es muy similar. Dado lo anterior se podría decir que entre la ruta del campero y el MIO se comparten tramos de rutas o casi que tienen la misma ruta para llegar al destino.

Para evaluar la concentración o dispersión en la relación de los datos demográficos con el número de paradas por cada unidad de análisis, se utilizaron diagramas de dispersión para ambos escenarios, calculados mediante Excel, los cuales se ven reflejados en la figura 25. Lo que se evidenció es que se han incrementado más paradas entre años al igual que la cantidad de usuarios que hacen uso de estas, es decir, existe más población potencial en el 2019 para la cantidad de paradas tenidas en cuenta.

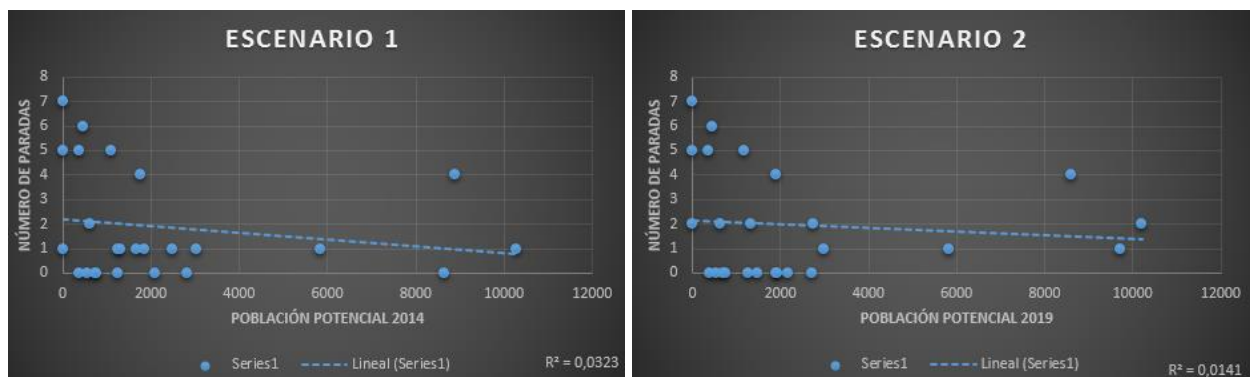


Figura 25. Diagramas de dispersión de población y paradas por cada escenario

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los resultados reflejados en los diagramas de dispersión, evidencian la no correspondencia y alta dispersión en los datos para cada unidad de análisis en los dos escenarios, por tal motivo no existe co-linealidad entre las variables.

7.3.2 ESCENARIO 1 – 2014

Teniendo la base de datos del proyecto almacenada en Excel, fue posible la integración de los datos necesarios para los cálculos estadísticos al Software SPSS Statistics, el cual evalúa la

correspondencia entre variables e indicadores y se analizan las relaciones para los análisis mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

Para la generación de la matriz de correlación en el primer escenario de análisis, se tuvo en cuenta las variables socioeconómicas, y los indicadores que influyen directamente en la condición de accesibilidad. Se generó una matriz simétrica de tamaño 15x15, con los coeficientes de correlación positivos y negativos, el cual ayudó a comprender el tipo de relación existente entre ellas en caso de que se relacionaran. La correlación se realizó con 34 variables; en la tabla 27 se presentan los coeficientes de correlación entre las variables e indicadores mencionados.

Se resaltan las correlaciones con un valor de significancia o $p\text{-value} < 0.05$, moderadas y altas, mayor a 0.6 en color negro las correlaciones positivas y con un valor inferior a -0,6 con color rojo las correlaciones negativas. Cabe expresar que el nivel de correlación no induce a que tengan co-linealidad las variables, pues esta depende de la distribución de los datos. En el anexo 3 se evidencia la tabla resumen de la correlación entre variables para ambos escenarios con el $p\text{-value}$ de cada relación, en la cual también se aprecian algunas relaciones con un valor de significancia de $p < 0.01$.

Tabla 27. Matriz de correlación escenario 1

	ESTRAT O MODA	POBLACIÓN POTENCIAL	DENSIDAD DEMOGRÁFICA	ÁREA ZAT km2	PARADAS	DENSIDAD RED CAMPEROS	DENSIDAD RED MIO	IPTP	FACTOR RUTA CAMPEROS	FACTOR RUTA MIO	ITV CAMPERO	ITV MIO	TMV CAMPERO	TMV MIO	ÍNDICE
ESTRATO MODA	1	-0,02	-0,06	-0,05	0,30	0,38	0,36	0,34	0,11	0,41	0,05	0,34	-0,22	-0,29	0,42
POBLACIÓN POTENCIAL	-0,02	1	0,46	0,91	-0,11	-0,31	-0,33	-0,22	0,37	-0,39	0,33	-0,38	0,33	0,28	-0,27
DENSIDAD DEMOGRÁFICA	-0,06	0,46	1	0,14	-0,63	-0,56	-0,60	-0,46	0,13	-0,32	0,13	-0,27	0,55	0,53	-0,50
ÁREA ZAT km2	-0,05	0,91	0,14	1	0,12	-0,17	-0,21	-0,15	0,39	-0,28	0,35	-0,30	0,16	0,12	-0,13
PARADAS	0,30	-0,11	-0,63	0,12	1	0,75	0,64	0,52	-0,06	0,38	-0,06	0,31	-0,55	-0,51	0,64
DENSIDAD RED CAMPEROS	0,38	-0,31	-0,56	-0,17	0,75	1	0,92	0,89	-0,12	0,27	-0,11	0,18	-0,55	-0,46	0,51
DENSIDAD RED MIO	0,36	-0,33	-0,60	-0,21	0,64	0,92	1	0,94	-0,18	0,26	-0,18	0,20	-0,62	-0,54	0,55
IPTP	0,34	-0,22	-0,46	-0,15	0,52	0,89	0,94	1	-0,13	0,11	-0,12	0,06	-0,45	-0,35	0,35
FACTOR RUTA CAMPEROS	0,11	0,37	0,13	0,39	-0,06	-0,12	-0,18	-0,13	1	-0,11	0,99	-0,08	0,28	0,30	-0,20
FACTOR RUTA MIO	0,41	-0,39	-0,32	-0,28	0,38	0,27	0,26	0,11	-0,11	1	-0,16	0,97	-0,47	-0,65	0,76
ITV CAMPERO	0,05	0,33	0,13	0,35	-0,06	-0,11	-0,18	-0,12	0,99	-0,16	1	-0,11	0,31	0,36	-0,25
ITV MIO	0,34	-0,38	-0,27	-0,30	0,31	0,18	0,20	0,06	-0,08	0,97	-0,11	1	-0,34	-0,54	0,68
TMV CAMPERO	-0,22	0,33	0,55	0,16	-0,55	-0,55	-0,62	-0,45	0,28	-0,47	0,31	-0,34	1	0,84	-0,81
TMV MIO	-0,29	0,28	0,53	0,12	-0,51	-0,46	-0,54	-0,35	0,30	-0,65	0,36	-0,54	0,84	1	-0,88
ÍNDICE	0,42	-0,27	-0,50	-0,13	0,64	0,51	0,55	0,35	-0,20	0,76	-0,25	0,68	-0,81	-0,88	1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Con base en lo anterior se evidencia la relación intrínseca entre algunos indicadores y variables, así como también los parámetros operacionales, por ejemplo, el número de paradas incide directamente en la calidad de los resultados de indicadores integrales como el IPTP y el índice de accesibilidad. En la figura 26 se exponen los diagramas de dispersión entre los indicadores de calidad de trazado y la densidad de red para el sistema de camperos.

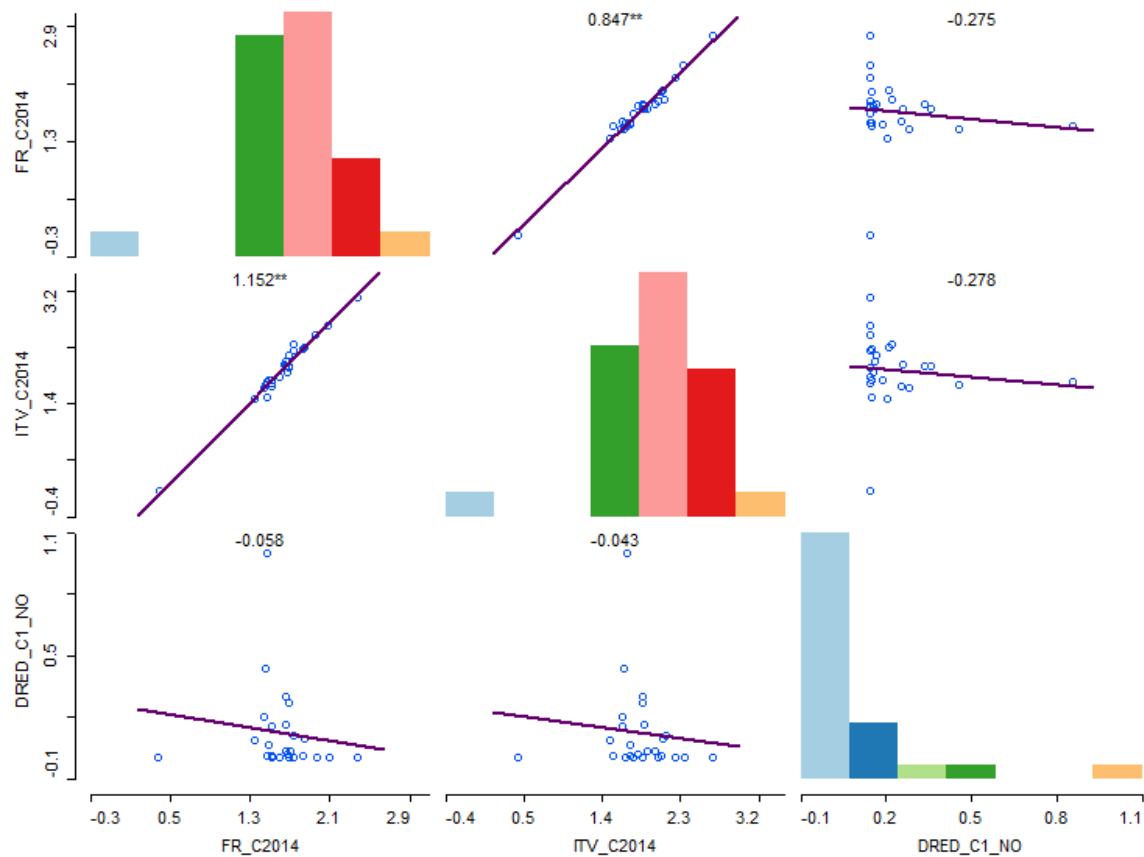


Figura 26. Diagramas de dispersión red camperos escenario 1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Según la matriz y diagramas, para la red de camperos en el año 2014, se evidencia la correlación altamente positiva y un grado de co-linealidad alto, entre el indicador de factor de ruta integral con el índice de trazado-velocidad, para estos indicadores topológicos es muy importante la distribución de la red del sistema de manera negativa, es decir, a mayor valor de los indicadores

debe ser menor la densidad debido a que se busca el camino más corto por un trayecto ideal en tiempo y distancia. En la figura 27 se evidencia la relación entre los mismos indicadores y la red de alimentadores del MIO.

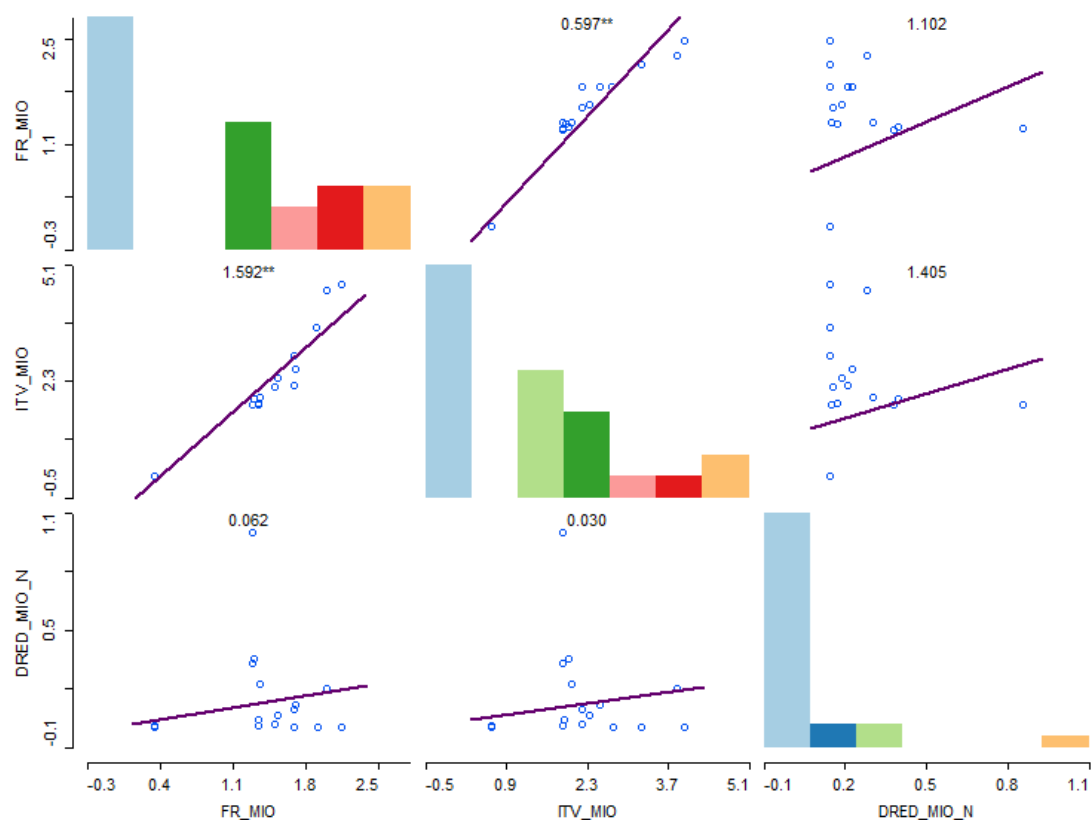


Figura 27. Diagramas de dispersión red de alimentadores escenario 1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

De igual forma, para la red de alimentador del MIO existe una correlación positiva entre los indicadores que son definidos por la densidad de la red en cada unidad de análisis; aunque la dispersión de los datos de indicadores con respecto a la densidad es evidente, se muestra una tendencia decreciente para la efectividad del mismo, es decir, a mayor valor del indicador, menos debe ser la densidad de infraestructura vial. El grado de co-linealidad para ambos sistemas, indican que para indicadores como el ITV y FR, la co-linealidad es exacta y para la densidad de la red es aproximada.

Por otra parte, los indicadores de accesibilidad integral como el ITP y el índice de accesibilidad global presentan valores diferentes para las unidades de análisis de acuerdo con la población y área de cada una de ellas, en las figuras 28 y 29 se evidencia la relación entre estas variables y la desviación estándar de estos indicadores.

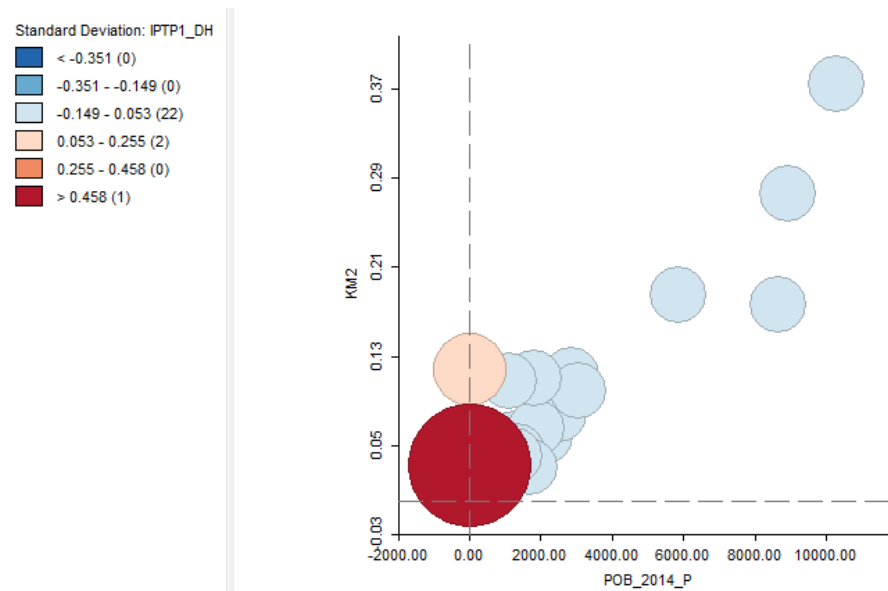


Figura 28. Desviación estándar de ITP según área y población – escenario 1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

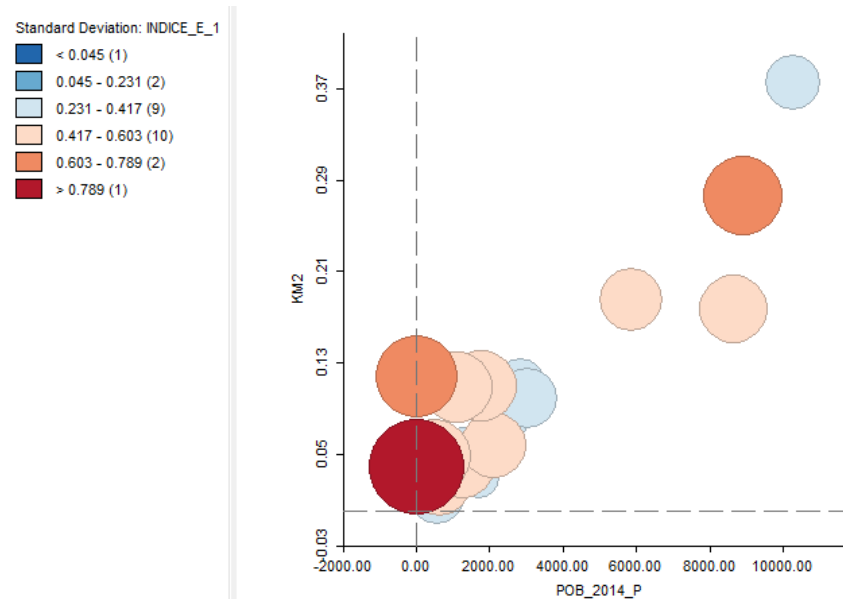


Figura 29. Desviación estándar del índice de accesibilidad según área y población – escenario 1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Con relación en lo anterior, se concluye que la distribución de los datos según la población y área de cada ZAT para el IPTP es más dispersa, presentando valores negativos, y correlación moderada solamente para una unidad de análisis. Por otro lado, el índice de accesibilidad presenta mejores datos de correlación respecto a las variables analizadas, con diez unidades con coeficientes de correlación moderada y tres con coeficientes altos. Por consiguiente, la desviación para el índice de accesibilidad resulta más homogénea que el IPTP en el primer escenario, indicando que los resultados presentan un grado mayor de dispersión y aleatoriedad.

La autocorrelación y co-linealidad entre estos dos indicadores para el año 2014 se expone en la figura 30.

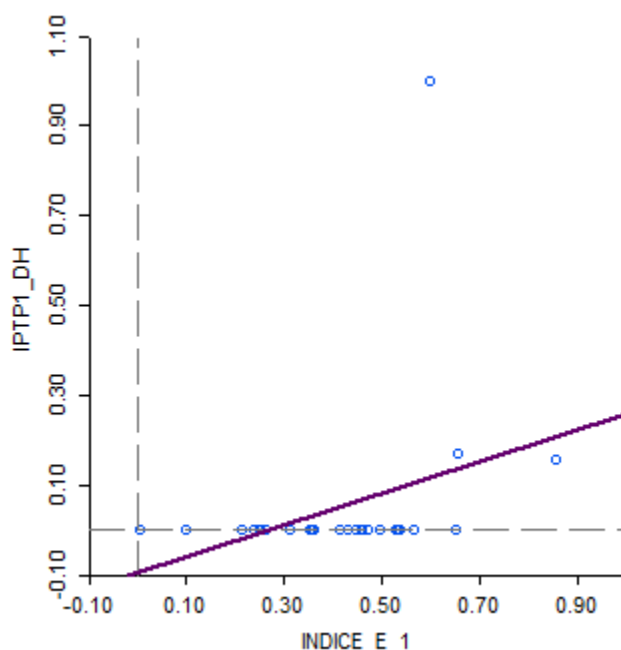


Figura 30. Diagrama de dispersión entre IPTP e Índice de accesibilidad – escenario 1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Según la figura anterior y el coeficiente generado por SPSS Statistics, la correlación entre estos indicadores es altamente positiva para un nivel de $p < 0,01$, pese a que la distribución del IPTP no sea homogénea y no muestra grado de co-linealidad, como se evidencia en la figura, la cual

refleja una distribución de los datos cercana a 0 con un valor atípico en 1, de acuerdo a la normalización del indicador. Lo anterior se refleja en la movilidad de la zona de estudio, a una mayor provisión de transporte, mejor resulta la condición de accesibilidad, teniendo en cuenta que hay muchos factores que influyen en ella.

7.3.3 ESCENARIO 2 – 2019

La implementación del STC MIO CABLE influyó considerablemente en el comportamiento de algunas variables, así como también en las relaciones entre algunos indicadores que evalúan los servicios ofertados y la demanda de usuarios, en este apartado se analizan las relaciones entre los indicadores que influyen en la condición de accesibilidad para el segundo escenario.

Es de anotar que al igual que en el primer escenario de evaluación, el análisis central de estas validaciones se realiza con respecto al IPTP y el índice de accesibilidad global, debido a que son las únicas mediciones que integran variables sociales y caracterizan integralmente los sistemas de transporte que operan en las unidades de análisis. Es necesario precisar que la evaluación topológica del STC MIO CABLE se realiza con respecto a las estaciones por lo que este sistema no utiliza la superficie vial para realizar los recorridos.

En la tabla 28 se reflejan los coeficientes de correlación entre las variables e indicadores incidentes en el impacto en la condición de accesibilidad por la implementación del MIO CABLE; el resultado fue una matriz simétrica de tamaño 19x19. De igual forma que en el escenario 1, se resaltan valores para las correlaciones moderadas y altas en color negro para las positivas, y en rojo para las negativas y que presentan un valor de significancia $p < 0.05$.

Tabla 28. Matriz de correlación escenario 2

	ESTRATO MODA	POBLACIÓN 2019	DENSIDAD DEMOGRÁFICA	ÁREA ZAT Km2	PARADAS	DENSIDAD RED CAMPEROS	DENSIDAD RED MIO	IPTP	FACTOR RUTA CAMPEROS	FACTOR RUTA MIO	ITV CAMPEROS	ITV MIO	TMV CAMPERO + MIO CABLE	TMV STM	GRAVEDAD E1	GRAVEDAD E2	GRAVEDAD E3	GRAVEDAD Cañaveralaje	ÍNDICE
ESTRATO MODA	1	-0,04	-0,08	-0,05	0,30	0,44	0,36	0,10	-0,06	0,41	-0,12	0,34	0,07	-0,04	-0,07	0,41	-0,11	-0,02	0,20
POBLACIÓN 2019	-0,04	1	0,47	0,89	-0,12	-0,34	-0,33	-0,26	0,13	-0,40	0,16	-0,39	-0,12	0,10	0,30	0,06	0,24	-0,28	0,03
DENSIDAD DEMOGRÁFICA	-0,08	0,47	1	0,13	-0,60	-0,57	-0,58	-0,52	-0,32	-0,36	-0,28	-0,31	0,21	0,39	0,54	-0,32	0,09	-0,56	-0,45
ÁREA ZAT Km2	-0,05	0,89	0,13	1	0,12	-0,19	-0,21	-0,18	0,26	-0,28	0,26	-0,30	-0,18	-0,02	0,06	0,24	0,23	-0,09	0,17
PARADAS	0,30	-0,12	-0,60	0,12	1	0,81	0,64	0,36	-0,07	0,38	-0,09	0,31	-0,27	-0,43	0,01	0,25	-0,17	0,32	0,62
DENSIDAD RED CAMPEROS	0,44	-0,34	-0,57	-0,19	0,81	1	0,86	0,53	-0,04	0,40	-0,06	0,32	-0,30	-0,39	-0,09	0,40	-0,15	0,37	0,47
DENSIDAD RED MIO	0,36	-0,33	-0,58	-0,21	0,64	0,86	1	0,82	-0,11	0,26	-0,12	0,20	-0,40	-0,51	-0,05	0,35	-0,21	0,59	0,50
IPTP	0,10	-0,26	-0,52	-0,18	0,36	0,53	0,82	1	-0,13	0,13	-0,14	0,08	-0,52	-0,66	-0,06	0,15	-0,19	0,74	0,54
FACTOR RUTA CAMPEROS	-0,06	0,13	-0,32	0,26	-0,07	-0,04	-0,11	-0,13	1	0,11	0,98	0,15	-0,07	0,17	-0,70	0,34	0,31	-0,11	-0,03
FACTOR RUTA MIO	0,41	-0,40	-0,36	-0,28	0,38	0,40	0,26	0,13	0,11	1	0,06	0,97	0,02	-0,16	-0,30	0,19	-0,50	0,28	0,41
ITV CAMPEROS	-0,12	0,16	-0,28	0,26	-0,09	-0,06	-0,12	-0,14	0,98	0,06	1	0,10	-0,06	0,19	-0,68	0,25	0,36	-0,15	-0,07
ITV MIO	0,34	-0,39	-0,31	-0,30	0,31	0,32	0,20	0,08	0,15	0,97	0,10	1	0,11	-0,05	-0,33	0,06	-0,51	0,20	0,34
TMV CAMPERO + MIO CABLE	0,07	-0,12	0,21	-0,18	-0,27	-0,30	-0,40	-0,52	-0,07	0,02	-0,06	0,11	1	0,82	-0,02	-0,45	-0,30	-0,63	-0,66
TMV STM	-0,04	0,10	0,39	-0,02	-0,43	-0,39	-0,51	-0,66	0,17	-0,16	0,19	-0,05	0,82	1	-0,09	-0,41	-0,11	-0,72	-0,80
GRAVEDAD E1	-0,07	0,30	0,54	0,06	0,01	-0,09	-0,05	-0,06	-0,70	-0,30	-0,68	-0,33	-0,02	-0,09	1	-0,25	-0,24	-0,13	-0,02
GRAVEDAD E2	0,41	0,06	-0,32	0,24	0,25	0,40	0,35	0,15	0,34	0,19	0,25	0,06	-0,45	-0,41	-0,25	1	0,17	0,37	0,33
GRAVEDAD E3	-0,11	0,24	0,09	0,23	-0,17	-0,15	-0,21	-0,19	0,31	-0,50	0,36	-0,51	-0,30	-0,11	-0,24	0,17	1	-0,29	-0,06
GRAVEDAD Cañaveralaje	-0,02	-0,28	-0,56	-0,09	0,32	0,37	0,59	0,74	-0,11	0,28	-0,15	0,20	-0,63	-0,72	-0,13	0,37	-0,29	1	0,67
ÍNDICE	0,20	0,03	-0,45	0,17	0,62	0,47	0,50	0,54	-0,03	0,41	-0,07	0,34	-0,66	-0,80	-0,02	0,33	-0,06	0,67	1

Fuente: Elaboración propia, 2019.

De acuerdo a la tabla anterior, se deduce que la distribución y configuración topológica de las redes, inciden directamente en la condición de accesibilidad de las zonas de análisis, es decir, presentan una fuerte correlación; cabe precisar que el grado de correlación no define la co-linealidad de las variables, la cual se aprecia mejor en diagramas de dispersión y relación lineal entre variables. Por ejemplo, a mayor número de paradas, los indicadores como el IPTP y el índice de accesibilidad, mejoran; los indicadores de factor de ruta e índice de trazado y velocidad, que evalúan la eficacia y eficiencia de los trayectos mediante las redes, se relacionan directamente con la densidad de infraestructura, a mayor densidad, menor es el valor de estos índices, es decir, es mejor la calidad de los trazados.

En la figura 31 se comparan los diagramas de dispersión de indicadores que proveen información de las redes del sistema de transporte tipo camperos, para los enfoques de infraestructura y operación como lo son el ITV, densidad de redes y factor de ruta.

Según la figura, al igual que en el primer escenario, se evidencia que la relación lineal entre indicadores como el ITV y FR presenta un grado de co-linealidad exacta y aproximada para la relación con el indicador de densidad, donde la distribución de los datos no se define por la recta de relación lineal. En relación con el primer escenario, pese a que la red de camperos cambió su distribución por las unidades de análisis, no presentó cambios significativos en la relación de los indicadores con la densidad de la red, de igual manera se mantuvieron las correlaciones altas entre indicadores. Cabe precisar que, dado que la red de STM no presentó cambios en los escenarios, no hubo necesidad de generar gráfica de dispersión y co-linealidad adicional.

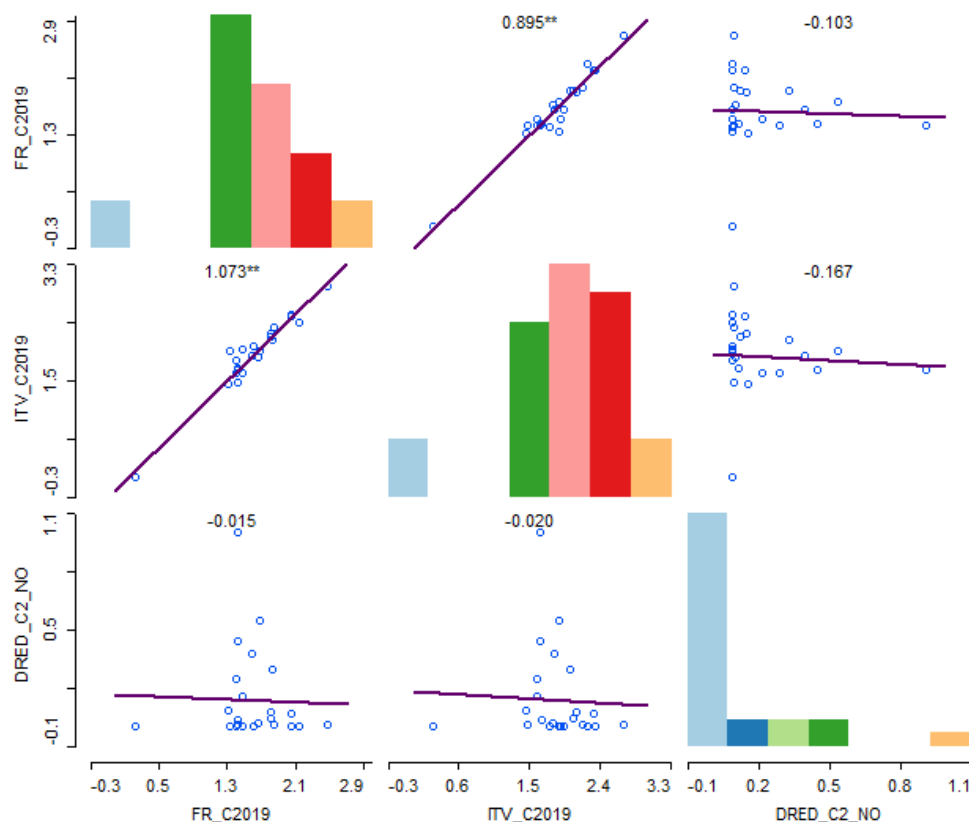


Figura 31. Diagramas de dispersión red de cameros escenarios 2

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Pese a que existe un grado de dispersión en los datos de la densidad de redes, dada la distribución por las unidades de análisis, se explica el comportamiento con los indicadores topológicos que relacionan la eficiencia y efectividad del trazado con los trayectos, a mayor grado de estos indicadores, menor es la calidad. Dado a que la infraestructura vial del Sistema de alimentadores no cambia en los escenarios, resulta útil evaluar el comportamiento descrito en el escenario anterior.

Para la medición del potencial de atracción de las estaciones de MIO CABLE, el cual solo se realizó en el segundo escenario, resulta interesante ver el comportamiento de cada una de ellas, en la figura 32 se presenta la relación existente entre la variable demográfica y el indicador de gravedad para cada estación del STC MIO CABLE.

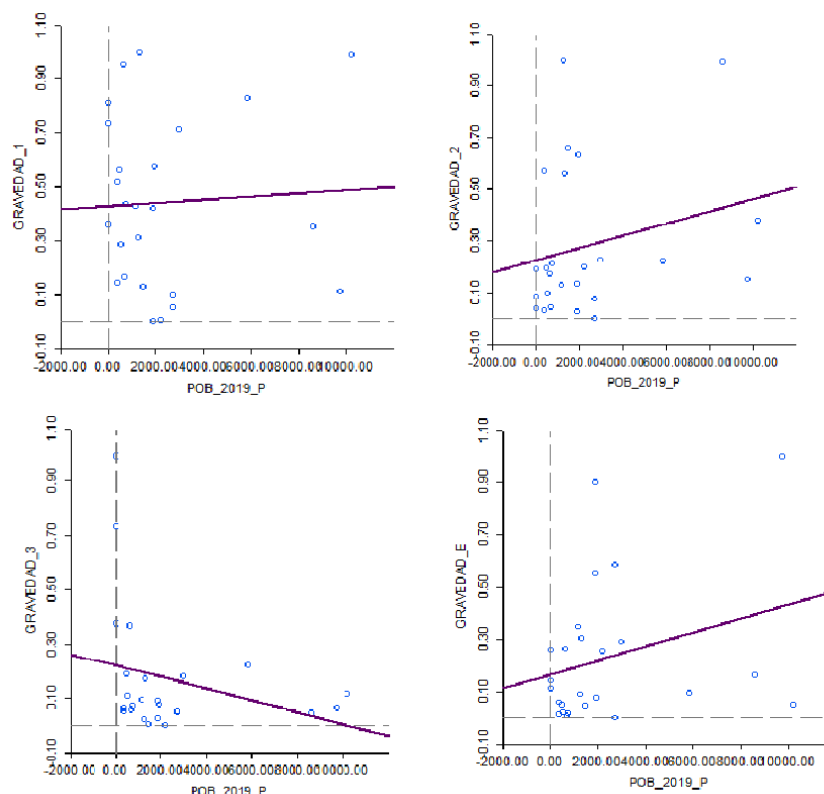


Figura 32. Diagramas de dispersión indicador de gravedad – escenario 2

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Las gráficas muestran correlaciones positivas en tres estaciones con valores moderados. Sin embargo, es interesante el comportamiento de la relación entre la estación con mayor potencial de atracción (Tierra Blanca) y la población, presenta una relación inversa con la población. Lo anterior indica que a medida que la población aumente, la atracción del nodo disminuye; la relación puede explicarse por la capacidad que tenga la infraestructura de recibir la demanda de población, para lo cual esta estación atrae la mayor cantidad de población ofertada.

Al igual que en el primer escenario, se comparan los indicadores que evalúan integralmente la accesibilidad con respecto a la población y área de las unidades de análisis. En la figura 33 se expone un diagrama de dispersión de la desviación estándar del IPTP con respecto a las variables socioeconómicas de las ZAT's. Los colores y tamaños de los puntos de desviación estándar del

indicador, reflejan la correlación entre las variables, por lo cual se infiere que solamente en dos unidades de análisis se presenta un coeficiente de correlación bueno; mientras que 22 ZAT's presentan valores muy bajos de correlación, como si el patrón de distribución fuese la aleatoriedad. Lo anterior puede explicarse por la dispersión de los datos resultantes del indicador.

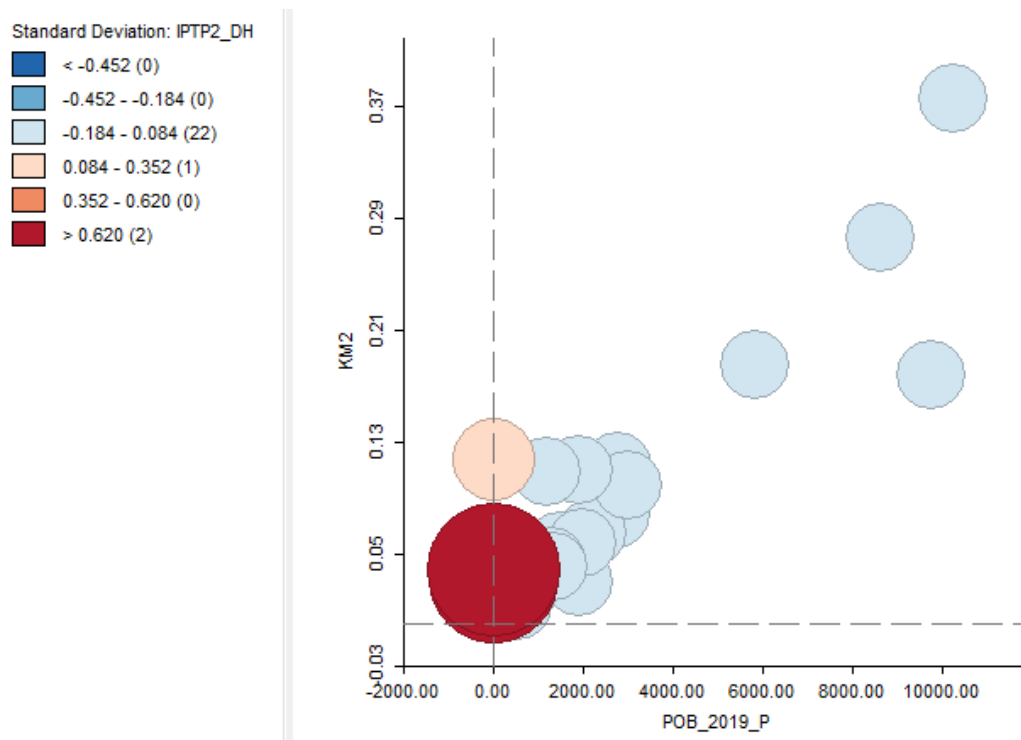


Figura 33. Desviación estándar del IPTP según área y población – escenario 2

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La desviación de los datos del índice de provisión para el segundo escenario no cambia mucho respecto al primero, existe concentración de la mayoría de datos en las unidades de análisis con población menor a 4000 habitantes con unos datos atípicos. En la figura 34 se presenta la distribución de la desviación para el índice de accesibilidad global, el cual presenta una mejor homogenización en la distribución de los valores.

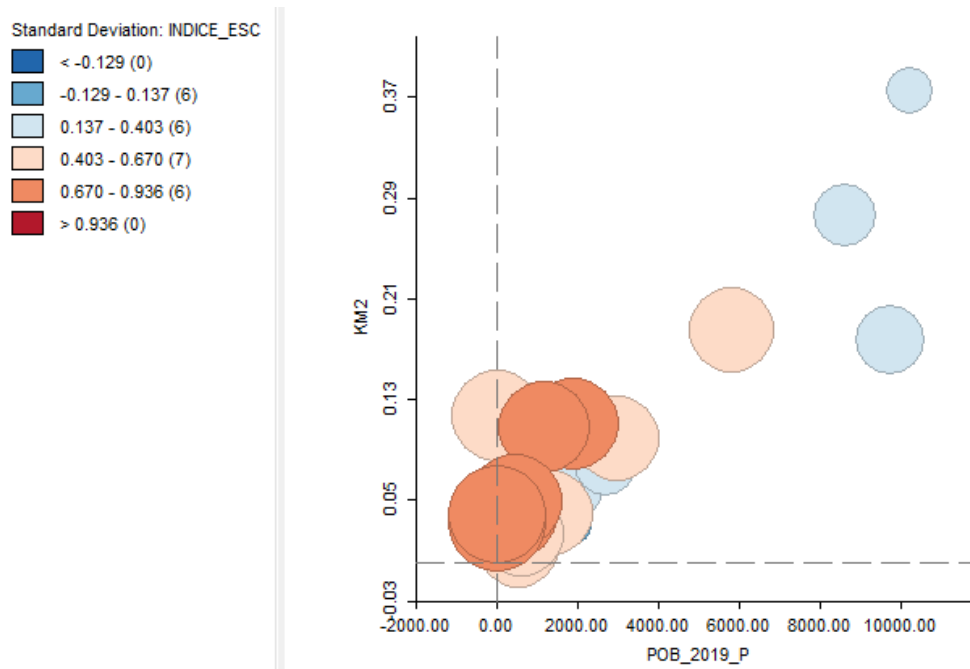


Figura 34. Desviación estándar del Índice según área y población – escenario 2

Fuente: Elaboración propia, 2019.

La implementación del MIO CABLE mejora los valores de los indicadores en el segundo escenario, así mismo reduce el nivel de desviación y dispersión especialmente en las unidades de análisis más cercanas a la infraestructura del sistema, por ejemplo, en este escenario se encuentran 13 de las 25 unidades de análisis con valores moderados y altos de correlación con respecto a las variables sociodemográficas.

La correlación entre el índice de provisión de transporte público y el índice de accesibilidad global se evaluó con SPSS Statistics y Excel con el propósito de determinar la relación lineal entre los dos indicadores integrales del estudio y evaluar el grado de co-linealidad entre estos indicadores. En la figura 35 se presenta el diagrama de dispersión entre estos dos índices.

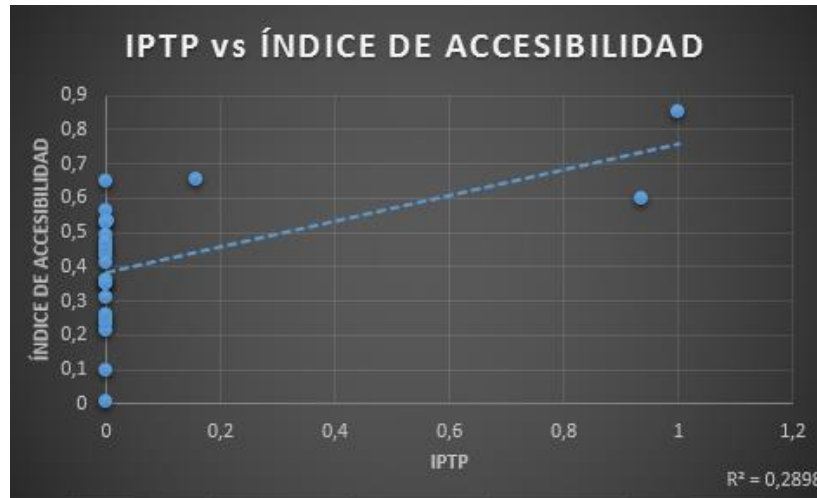


Figura 35. Diagrama de dispersión entre IPTP e Índice de accesibilidad – escenario 2

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Según lo expresado en la figura, la matriz, el valor de significancia de la relación con un valor de $p < 0,05$ y el valor del coeficiente de correlación, existe una correlación espacial alta y positiva entre los dos indicadores que evalúan integralmente la condición de accesibilidad en las unidades de análisis, pese a que el IPTP se enfoca más a la provisión del transporte en una zona y el índice a la capacidad de la demanda, ambos muestran tendencias similares, la distribución de la accesibilidad en el segundo escenario disminuye en las zonas más lejanas en términos de impedancia y aumenta considerablemente en las áreas de cobertura del STC MIO CABLE.

Pese a que para el IPTP existe mayor concentración de algunos datos, y para el Índice la distribución de la información es más homogénea, es decir, no existe co-linealidad entre las variables, es posible inferir que ambas mediciones se auto correlacionan entre sí, es decir si aumenta la oferta de transporte y calidad del mismo, aumenta la cobertura y nivel de acceso de la población beneficiada.

7.4 CUANTIFICACIÓN DE IMPACTO EN LA ACCESIBILIDAD Y EXCLUSIÓN

Los sistemas de transporte deben minimizar la fricción generada por el costo de desplazamiento, rompiendo la barrera de la distancia socioeconómica, que según (Vivas Pacheco, 2011), es mucho más crítica que la distancia física. Con base en la información producida en esta investigación se pueden realizar estimaciones para determinar el impacto generado en la movilidad respecto a los tiempos de desplazamiento y el nivel de exclusión social desde un enfoque netamente geográfico, con respecto a la población segregada por los sistemas.

Como lo plantea (Hernández, 2017) la movilidad no llega a todos los estratos por igual, condicionando la facilidad de acceso desde y hacia la comunidad; el transporte público produce un menor recargo monetario, des mercantilizando la movilidad. Desde este ámbito, es vital implementar en los análisis las variables socioeconómicas pues la distancia agudiza la vulnerabilidad y limita las oportunidades de la población, influyendo directamente en la calidad de vida de los usuarios de transporte (Vivas Pacheco, 2011). El análisis de exclusión en este estudio se limita a la evaluación de la segregación espacial de la población de acuerdo a la cobertura de los mismos, por tanto, la única variable económica incluida en el estudio es el estrato moda por manzana. Dado a que el estrato no es muy variable, no es posible detallar con precisión la condición de accesibilidad relacionada con esta variable. La evaluación multidimensional de las relaciones entre los componentes del sistema y su entorno, proporciona información relevante para la comprensión de la situación problema; como lo plantea (Vivas Pacheco, 2011) la calidad de vida se ve afectada por factores como acceso y cobertura de servicios e integración de mercado.

De acuerdo con la variable de trayectoria mínima, calculada a partir de los tiempos mínimos de viaje por cada modo en las ZAT's (tablas 19 y 20), teniendo como base las matrices

OD y áreas de servicio, es posible cuantificar el gradiente de los tiempos desde todas las unidades de análisis a la Terminal Cañaveralejo. En la tabla 29 se relacionan los gradientes de tiempo y áreas de servicio para inferir en el impacto en la condición de accesibilidad generado en el segundo escenario de análisis.

Tabla 29. Cálculo de gradiente para ahorro de tiempos de viaje

ZAT	TM ESCENARIO 1		TM ESCENARIO 2		GRADIENTE EN MINUTOS	GRADIENTE EN DISTANCIA	% AHORRO TIEMPO
	Tiempo minutos	Distancia metros	Tiempo minutos	Distancia metros			
1	21,93	2077,17	21,93	2077,17	0,00	0,00	0,00%
2	19,81	1989,51	19,81	1989,51	0,00	0,00	0,00%
3	17,01	1798,58	17,01	1798,58	0,00	0,00	0,00%
4	20,65	1981,98	20,65	1981,98	0,00	0,00	0,00%
5	12,63	1247,82	12,63	1247,82	0,00	0,00	0,00%
6	22,93	2058,19	22,93	2058,19	0,00	0,00	0,00%
7	27,62	2216,36	18,72	2052,39	8,90	163,96	32,23%
8	12,40	977,55	11,13	820,97	1,26	156,59	10,18%
9	24,55	1808,21	14,11	1464,84	10,44	343,38	42,53%
10	16,80	1156,97	16,05	1090,92	0,75	66,05	4,47%
11	7,23	542,59	4,29	321,70	2,95	220,89	40,71%
12	9,69	970,72	9,69	970,72	0,00	0,00	0,00%
13	13,92	1230,32	13,92	1230,32	0,00	0,00	0,00%
14	12,94	1762,69	12,94	1762,69	0,00	0,00	0,00%
15	11,32	1638,15	11,32	1638,15	0,00	0,00	0,00%
16	22,39	2051,16	18,77	2495,44	3,62	-444,28	16,16%
17	28,56	2691,67	16,89	2422,33	11,67	269,34	40,86%
18	24,24	2068,68	11,30	2110,87	12,94	-42,18	53,37%
19	10,60	1337,98	10,60	1337,98	0,00	0,00	0,00%
20	34,27	3336,00	23,47	2356,55	10,80	979,45	31,52%
21	31,26	2674,71	16,66	1987,76	14,61	686,95	46,72%
22	29,89	2932,10	11,96	1922,18	17,93	1009,92	59,98%
23	24,46	2319,81	9,13	1613,64	15,33	706,18	62,69%
24	20,95	1956,22	14,32	1858,62	6,63	97,59	31,64%

Fuente: Elaboración propia, 2019.

El propósito de la tabla anterior es identificar las unidades de análisis mejor beneficiadas con el MIO CABLE respecto a los tiempos de viaje resaltados en negro. De acuerdo con estos

valores, se infiere que la implementación del STC MIO CABLE mejoró sustancialmente la accesibilidad y movilidad, especialmente en las áreas aledañas a cada estación, definidas por parámetros como la impedancia por tiempo de caminata en vez de las distancias; la anterior afirmación se soporta teórica y gráficamente con los resultados de los indicadores de accesibilidad integral como el IPTP y el índice de accesibilidad global.

Por otro lado, es posible estimar el grado de exclusión social o segregación de población por parte de los sistemas de transporte para el escenario 2, de acuerdo con las áreas de servicio de las redes y la población potencial cubierta por cada unidad de análisis; esta información se encuentra expuesta en la tabla 19, en el análisis del enfoque de cobertura para cada sistema. Esta idea se soporta con el cálculo del índice de Moran para evaluar los patrones de distribución del indicador de accesibilidad en el área de estudio, con el objetivo de identificar clústeres poblacionales desglosados mediante el método LISA (*Local indicator of spatial association*) para evidenciar el grado de distribución o segregación espacial de la accesibilidad. El índice de moran se calculó en ArcGIS, generando el reporte que se presenta en la figura 36, mientras que los clústeres que permiten la visualización grafica de los grupos poblacionales se muestran mediante el uso del Software GEODA. En esta investigación se usó el índice de accesibilidad global para el cálculo del índice de moran, al presentar una mejor distribución de los datos en las unidades de análisis.

El índice de Morán, solamente fue calculado en el segundo escenario para evaluar la distribución espacial de la condición de accesibilidad con la implementación del MIO CABLE, y su grado de afectación a la segregación o exclusión social. De igual forma, los clústeres mediante el método LISA, aportan a esta teoría.

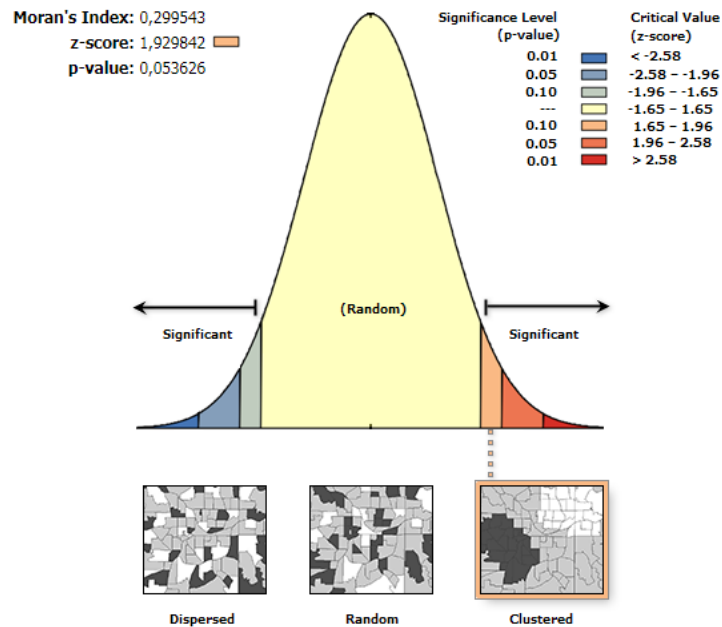


Figura 36. Correlación espacial del índice de accesibilidad por el Índice de Moran
 Fuente: Elaboración propia a partir de ArcGIS, 2019.

Los valores de significancia de p y z nos permiten rechazar la hipótesis nula, es decir los datos no se dan por aleatoriedad; el índice de moran positivo nos indica que existe concentración de valores altos y bajos por medio de clústeres, es decir un patrón de distribución agregado, apenas lógico para la condición de accesibilidad de acuerdo a los sistemas de transporte. Dado que este índice provee información general a nivel de toda el área de estudio, se utilizan los indicadores locales para evaluar las unidades de análisis que están en situación de ventaja o desventaja respecto al indicador.

En la figura 37 se muestran los clústeres evaluados por cada unidad de análisis mediante el método LISA que presenta el Software GEODA, estos clústeres hacen referencia a los grupos poblacionales de cada ZAT que aportan a la distribución espacial de la accesibilidad.

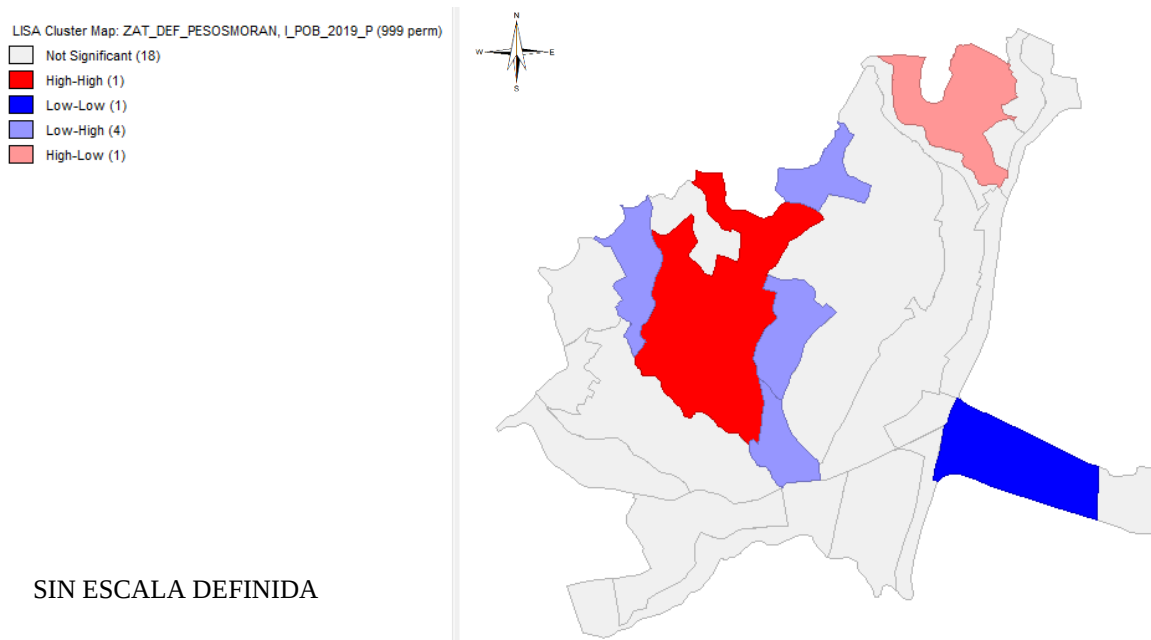


Figura 37. Distribución de clústeres para el índice de accesibilidad según índice de Moran

Fuente: Elaboración propia a partir de GEODA, 2019.

Según (Vivas Pacheco, 2011), estos clústeres permiten estimar la segregación de la población de acuerdo con la forma en la que se agrupan los datos; por tanto, los valores poblacionales aportan en la medida que se evidencia en la figura, a la distribución espacial de la accesibilidad. De esta forma se puede inferir que la unidad de color rojo (ZAT 23) tiene valores altos de población y aporta valores altos a la condición de accesibilidad; caso contrario el de la unidad 4, la cual presenta valores altos de población, pero ofrece valores bajos para la condición de accesibilidad. Las unidades aledañas a la ZAT 23, presentan grupos poblacionales con valores bajos que aportan valores altos para la distribución de la accesibilidad, las unidades sin color hacen referencia a las ZAT's que no presentan patrones de aglomeración o segregación de población respecto a la condición de accesibilidad.

Por otro lado, la segregación o exclusión generada por el desequilibrio de la distribución de la accesibilidad en la Comuna, puede verse reflejado en la figura 38, la cual refleja la relación

entre el índice de accesibilidad y el estrato moda de las unidades de análisis mediante el indicador de morán bivariado.

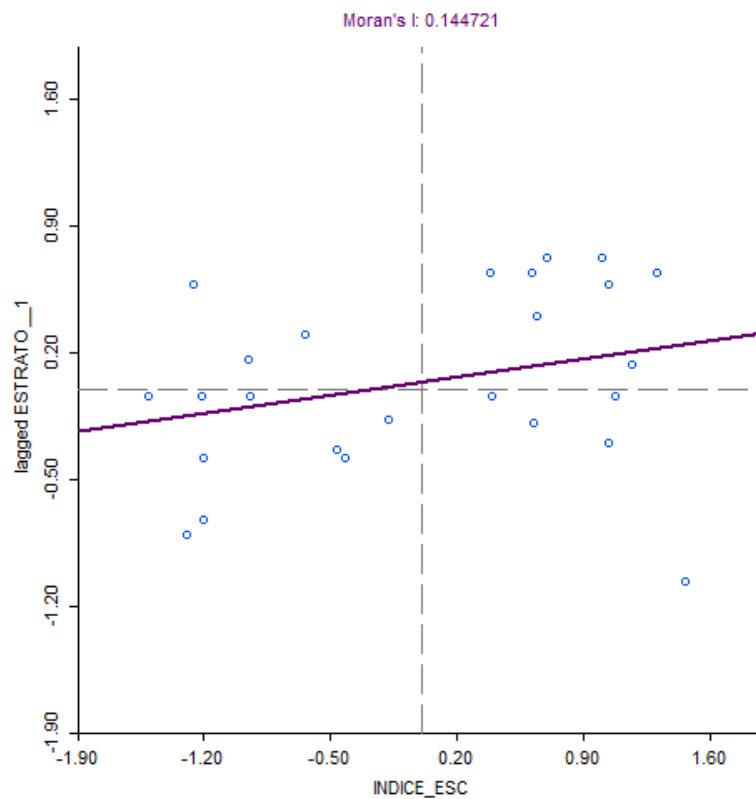


Figura 38. Índice de Moran bivariado entre índice de accesibilidad y estrato moda
Fuente: Elaboración propia a partir de GEODA, 2019.

Si bien el valor del índice es positivamente bajo, la figura indica la concentración agregada de los valores de accesibilidad en el estrato moda de las unidades de análisis. La relación muestra una tendencia regular debido a la poca variación del estrato.

El uso de clústeres poblacionales para explicar la distribución espacial de la condición de accesibilidad, y el cálculo de cobertura por cada sistema, permite datar de manera superficial, un grado de exclusión o segregación poblacional específicamente en las unidades de análisis ubicadas en la parte alta de la ladera, afectando los barrios como La Sultana Pueblo Joven, Siloé en la parte alta y Lleras. Sin embargo las evaluaciones desde la perspectiva social requiere más detalle y

cuidado, pues como lo plantean (Zapata Córdoba, Stanley, & Stanley , 2014) y (Brand & Dávila, 2011), la administración e integración efectiva de la comunidad beneficiada debe efectuarse en todos los ámbitos para evaluar los cambios en la economía y pobreza de las zonas, pues si no se reducen las barreras económicas la inclusión social queda sin efecto.

Por otra parte, autores como (Bernier, 2014), (Moyano, Prieto, & Martínez, 2018) y (Velásquez Villada, 2018), evalúan el posible impacto en la movilidad y la inclusión social generado en la implementación futura de STC en ciudades como Bogotá y Pereira, concluyendo que la conectividad de las zonas mejora sustancialmente, pero es necesario analizar a detalle la influencia que tenga cada estación respecto a oportunidades y niveles de ingresos para inferir en el impacto social. La inversión en estos sistemas, es un eje de análisis en autores como (Velásquez Villada, 2018), (Escobar, Tapasco, & Giraldo, 2015), (Escobar , Tamayo, & Holguín, 2016), planteando que si bien es menor respecto a otros sistemas en la relación costo – beneficio, no produce cambios sustanciales en los tiempos de desplazamiento hacia los centros de actividad económica en Ciudades como Manizales y Pereira.

Dado lo anterior, para precisar mejor el impacto social de la implementación del STC MIO CABLE, es necesario incluir en el análisis variables económicas como ingresos, ocupación, métrica de capital, entre otros aspectos que permitan obtener un panorama más acertado de la dinámica social relacionada con el transporte, puesto que, tal y como lo plantea (Hernández, 2017), la disponibilidad espacial del sistema de transporte, no garantiza el uso del mismo.

8. CONCLUSIONES

La disponibilidad y calidad de la información es un factor determinante en la precisión de los productos obtenidos a partir de la modelación del transporte; en esta investigación se presentaron limitaciones respecto a este aspecto, como por ejemplo la no correspondencia de los datos demográficos con la dinámica del territorio actual, o la falta de organización en el sistema de transporte por campero, donde existen rutas no aprobadas por las entidades competentes, fomentando en cierto grado la informalidad; lo cual genera un grado de imprecisión en las condiciones de accesibilidad estimadas.

La evaluación en ambos escenarios permitió establecer que la implementación del STC MIO CABLE mejoró la condición de accesibilidad y tiempos de viaje directamente en seis de las 25 unidades de análisis objeto de estudio, beneficiando a barrios como Siloé, Tierra Blanca, Lleras Camargo, parte de La Sultana y Brisas de Mayo; y alrededor de 3000 usuarios potenciales de transporte público, según estimaciones hechas en este estudio.

La combinación del uso de medidas agregadas, desagregadas, topológicas e integrales con el análisis estadístico-espacial, incluyendo variables socioeconómicas provee una modelación efectiva y acertada de la condición de accesibilidad territorial urbana, permitiendo generar un insumo metodológico para estudios posteriores, y a su vez un diagnóstico para el ordenamiento territorial y la planificación del transporte.

Pese a que los tiempos de recorrido hacia la terminal Cañaveralejo como punto de conexión con el resto de la ciudad mejoraron sustancialmente en estas unidades de análisis con la implementación del sistema de transporte por cable, para las demás ZAT, especialmente las que se encuentran ubicadas en la parte alta de la ladera, presentan tiempos de recorrido muy altos sin

dependencia del modo de transporte usado. Esto puede tener muchos factores explicativos, principalmente la dificultad de acceso por la configuración que presenta la comuna, lo que genera un costo mayor de desplazamiento y por tanto genera fricción en la distancia espacial; el uso de sistemas de transportes alternativos como el STC que no utiliza la superficie vial, evitando congestiones, deterioros y pendientes pronunciadas minimiza ese efecto.

La falta de integración logística, tarifaria, espacial y de infraestructura entre el STM y el sistema de transporte por camperos genera una dependencia de usuarios según las condiciones de los viajes basados en el hogar y el destino, provocando un recargo que afecta directamente al usuario por la elevación de costos. En este estudio se evaluaron desplazamientos desde las unidades de análisis hasta la terminal Cañaveralejo teniendo en cuenta los modos que operan en la Comuna, sin embargo el nivel de usuarios que hace este recorrido en la realidad, es mínimo, porque el destino no es la terminal sino los puntos de conexión que tiene la red en la Ciudad; al momento de elegir un destino que no sea cubierto por el sistema de camperos pero si por el STM, el usuario deberá cubrir una carga generalmente monetaria para garantizar su acceso, lo que en muchos casos estimula el uso de transporte informal. Cabe resaltar que, para esta investigación, el uso de transporte público tradicional que opera en la parte baja de la Comuna, fue desestimado para los cálculos debido a que los trayectos tienen una configuración transitoria y no conectora en la zona de estudio.

Esta investigación evalúa el impacto generado por la implementación del STC desde el punto de vista geográfico, relacionado con la segregación espacial de los grupos poblacionales limitados por las condiciones de accesibilidad; sin embargo el análisis del impacto social debe realizarse con mayor detalle teniendo en cuenta variables socioeconómicas que sean propias del

área objeto de estudio, con el fin de evaluar los factores que influyen en el uso del sistema de transporte público, como por ejemplo la capacidad de pago, el nivel de ingresos y demás variables que permitan analizar con minucia los efectos de la inaccesibilidad al transporte, como por ejemplo: la falta de oportunidades, la limitación en las participaciones en bienes y servicios por parte de la comunidad, los recargos monetarios por las tarifas, entre otros que desestiman el uso del transporte público y promueven el uso de transporte informal.

Esta investigación permitió modelar de manera acertada los viajes potencialmente generados desde y hacia la comuna, y su variación de acuerdo al modo de transporte empleado, sin embargo, para precisar los movimientos reales de los usuarios y su impacto en la movilidad de acuerdo a los tiempos de desplazamiento, se recomienda profundizar el estudio incluyendo variables o parámetros de todos los modos incidentes tanto oficiales, como no oficiales, que influyen en la condición de accesibilidad de la zona de estudio, tales como: taxi, moto taxismo, bicicleta, entre otros.

REFERENCIAS

- Achuthan, K., Titheridge, H., & Mackel, R. L. (2010). Mapping accessibility differences for the whole journey and for socially excluded groups of people. *JOURNAL OF MAPS*, 220-229.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2008). *Plan de Desarrollo 2008-2011 Comuna 20*. Santiago de Cali.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2012). *Plan de Desarrollo 2012-2015 Comuna 20*. Santiago de Cali.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2014). *CALI EN CIFRAS 2013*. Santiago de Cali: Departamento Administrativo de Planeación Municipal.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2016). *Matriz estratégica Plan de Desarrollo 2016-2019 Comuna 20*. Santiago de Cali.
- Alcaldía de Santiago de Cali. (2018). *CALI EN CIFRAS 2017*. Santiago de Cali: Departamento Administrativo de Planeación Municipal.
- Álvarez, L., Méndez, G., & Martins, N. (2014). Los sistemas peatonales como sistemas de transporte. *Revista Científica*, 21, 53-64.
- Amézquita, L., Durán, D., & Fajardo, D. (2016). MATRIZ ORIGEN-DESTINO Y EFICIENCIA EN MODOS DE TRANSPORTE URBANO: UN ANÁLISIS DE LA MOVILIDAD DE BOGOTÁ. *Semestre Económico*, 19(39), 91-112.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2016). *Transporte Urbano y Pobreza: Efectos de los Sistemas de Transporte rápido de autobuses apoyados por el BID sobre la movilidad y el acceso en Cali y Lima*. New York: BID.
- Bautista, A. F. (2018). Análisis de accesibilidad y conectividad de la red vial intermunicipal en el microsistema regional de la provincia Centro en Boyacá Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 23(1), 123-141.
- Bernier, A. (16 de Junio de 2014). CABLE AÉREO. PROPUESTA DE MOVILIDAD URBANA Y DESARROLLO SOSTENIBLE DE LA UPZ-69 ISMAEL PERDOMO DE LA LOCALIDAD CIUDAD BOLÍVAR. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.
- Bhat, C., Handy, S., Kockelman, K., Mahmassani, H., Chen, Q., & Weston, L. (2000). *ACCESSIBILITY MEASURES: FORMULATION CONSIDERATIONS AND CURRENT APPLICATIONS*. UNIVERSITY OF TEXAS. TEXAS: CENTER OF TRANSPORTATION RESEARCH.
- Bocarejo, J., & Velásquez, J. (2012). URBAN TRANSFORMATION IN LOW-INCOME SETTLEMENTS AND COLOMBIAN CABLE-CAR TRANSPORT SYSTEMS: TRANSFERABILITY AND POLICY IMPLICATIONS. *Sixth Urban Research and Knowledge Symposium*, (págs. 1-14).
- Brand, P., & Dávila, J. (2011). Aerial cable-car systems for public transport in low-income urban areas: lessons from Medellín, Colombia. *Transportation, Infrastructure and Planning* (págs. 1-18). Perth (WA): Third World Planning Schools Congress.

Bravo Serna, B., & Hurtado Urrea, A. (Junio de 2016). ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA ACCESIBILIDAD DE NUEVOS PROYECTOS DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE MASIVO EN SANTIAGO DE CALI. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

CAF, & AFD. (2018). *Diseño e implementación de sistemas de transporte por cable para comunidades de difícil acceso*. BANCO DE DESARROLLO DE AMÉRICA LATINA.

Cali Cómo Vamos. (2015). *Encuesta de percepción ciudadana*. Santiago de Cali.

Cardozo, O., Gómez, E., & Parras, M. (2009). TEORÍA DE GRAFOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA APLICADOS AL TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS EN RESISTENCIA (ARGENTINA). *Transporte y Territorio*(1), 89-111.

Carvajal, K. (15 de Agosto de 2016). ACCESIBILIDAD, INTERMODALIDAD Y ARQUITECTURA EN LOS SISTEMAS INTEGRADOS DE TRANSPORTE MASIVO: LA ESTACIÓN CAÑAVERALEJO DEL MASIVO INTEGRADO DE OCCIDENTE (MIO) EN CALI, COLOMBIA. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Cheng, Y.-H., & Chen, S.-Y. (2015). Perceived accessibility, mobility and connectivity of public transportation systems. *Science Direct*, 386-403.

Dávila, J. D. (2013). *Urban mobility y poverty*. Medellín.

Delbosc, A., & Currie, G. (2011). The spatial context of transport disadvantage, social exclusion and well-being. *Journal of Transport Geography*, 19, 1130-1137.

Escobar, D., Tamayo, J., & Holguín, J. (2016). Propuesta Metodológica de evaluación del transporte Público Colectivo a partir de un análisis de accesibilidad global. Caso de estudio: Manizales y Villamaría - Colombia. *Espacios*, 37(24), 17.

Escobar, D., & García, F. (2011). Impacto de un sistema de transporte tipo cable sobre la movilidad urbana. Caso Manizales (Colombia). *AVANCES Investigación en Ingeniería*, 14, 1-7.

Escobar, D., Tapasco, O., & Giraldo, J. (Diciembre de 2015). Medición del desempeño del Sistema de Transporte Cable Aéreo de la Ciudad de Manizales en Colombia, usando tres enfoques: Analítico, Simulado y de Accesibilidad Urbana. *Información tecnológica*, 26(6), 199-210.

Geurs, K., & Van Wee, B. (2004). Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *JOURNAL OF TRANSPORT GEOGRAPHY*(12), 127-140.

Giraldo Alzate, O. M., Giraldo Díaz, R., Caballero Lozada, M. F., Sánchez Jiménez, W., Nieto Gómez, L. E., & Galarza González, P. (2015). *El mapa como discurso de lo cotidiano. Cartografía Social de Siloé*. Santiago de Cali: Mariposas Amarillas.

GIRÃO, R., Pereira, W., & Fernandes, P. (2017). ACCESSIBILITY INDEX ELABORATION BY NETWORK GEOSPATIAL ANALYSIS. *Mercator*, 16, 1-20.

Gómez, A. (2005). EL ESTADO DEL ARTE EN LA MODELACIÓN DE PROBLEMAS DE TRANSITO. Manizales, Caldas, Colombia.

Gutiérrez, J., Nieto, R., Ruiz, E., Jaraíz, F., & Su Jeong, J. (2014). ANÁLISIS DE LA ACCESIBILIDAD AL AUTOBÚS URBANO DE MÉRIDA. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*(64), 249-272.

Heinrichs, D., & Bernet, J. (2014). Public Transport and Accessibility in informal Settlements: Aerial Cable Cars in Medellín, Colombia. *International Scientific Conference on Mobility and Transport*, (págs. 1-17).

Hernández, D. (2017). Transporte público, bienestar y desigualdad: cobertura y capacidad de pago en la Ciudad de Montevideo. *Revista de la CEPAL*(122), 165-184.

Huertas Rodríguez, H., & Serrano Florez, C. (Agosto de 2017). ANÁLISIS TERRITORIAL DE LA ACCESIBILIDAD COMO INDICADOR DE LA CALIDAD DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE MASIVO - SITM EN SANTIAGO DE CALI. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Jara, M., & Carrasco, J. A. (2009). INDICADORES DE INCLUSIÓN SOCIAL, ACCESIBILIDAD Y MOVILIDAD: EXPERIENCIAS DESDE LA PERSPECTIVA DEL SISTEMA DE TRANSPORTE. *INGENIERÍA DE TRANSPORTE*, 14(1), 18-25.

Jaramillo, C., Lizárraga, C., & Grindlay, A. (2012). Spatial disparity in Transport Social needs and public transport provision in Santiago de Cali (Colombia). *JOURNAL OF TRANSPORT GEOGRAPHY*, 24, 340-357.

Jurado Barco, M. Á., & Tovar Mambuscay, S. (2016). EVALUACIÓN DE LA EQUITAD DESDE LA COBERTURA DEL SERVICIO DEL AUTOBÚS DE TRÁNSITO RÁPIDO (BRT) HACIA LAS INSTITUCIONES EDUCATIVAS PÚBLICAS EN SANTIAGO DE CALI. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Kamruzzaman, M., Yigitcanlar, T., Yang, J., & Afzan Mohamed, M. (2016). Measures of Transport-Related Social Exclusion: A critical Review of the literature. *Sustainability*(8), 1-30.

Kenyon, S., Rafferty, J., & Lyons, G. (2003). Social Exclusion and Transport in the UK: A Role for Virtual Accessibility in the Alleviation of Mobility-Related Social Exclusion? *JOURNAL OF SOCIAL POLICY*, 3(32), 317-338.

Lerma, E. (2017). CARACTERIZACIÓN DEL TRANSPORTE PÚBLICO BASADO EN CAMPEROS EN LA COMUNA 18 DE CALI, MEDIANTE INDICADORES DE ACCESIBILIDAD Y HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS GEOGRÁFICO. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Loyola Gómez, C. (2005). *INFRAESTRUCTURA VIAL Y NIVELES DE ACCESIBILIDAD ENTRE LOS CENTROS POBLADOS Y LOS CENTROS DE ACTIVIDAD ECONÓMICA DE LA PROVINCIA DE ÑUBLE, VIII REGIÓN*.

Martínez Ortega, D. (2012). Estrategias para promover la accesibilidad, cobertura y calidad en el sistema de transporte público urbano para la población con discapacidad física: Caso Bogotá. Bogotá.

Martínez Sánchez, H. S. (2012). LA ACCESIBILIDAD REGIONAL Y EL EFECTO TERRITORIAL DE LAS INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE. APLICACIÓN EN CASTILLA-LA MANCHA. *Boletín de la Asociación de Geógrafos*(59), 79-103.

Metrocali. (2010). *Especificaciones técnicas del sistema de transporte aerosuspendido, MIO CABLE, para la comuna 20 de Santiago de Cali*. Santiago de Cali.

Monsalve Téllez, J. M., & Piedrahita Quintero, P. A. (Diciembre de 2017). Accesibilidad en la reactivación de la red férrea del Pacífico, Colombia. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Moyano, N., Prieto, A., & Martínez, F. (2018). Evaluación de los Impactos Sociales Proyectados para Transmicable en torno a la Estación Juan Pablo II de la Localidad Ciudad Bolívar. Bogotá, Cundinamarca, Colombia.

Murillo Hoyos, J. (2007). ANÁLISIS DE ACCESIBILIDAD VIAL PARA EL DEPARTAMENTO DE VALLE DEL CAUCA. Santiago de Cali, Valle del Cauca.

OMT. (2015). Indicadores para el estudio de la accesibilidad en el turismo. En O. M. Turismo, *Manual sobre Turismo Accesible para todos: Principios, herramientas y buenas prácticas* (págs. 1-87). Madrid: UNWTO.

Orro, A., Novales, M., & Rodríguez, M. (2003). *Transporte por cable*. Coruña: Tórculo Artes Gráficas.

Pacheco Gago, J. (2003). APLICACIONES DE INDICADORES DE ACCESIBILIDAD. *Evolución de indicadores asociados a la medición de conectividad y utilidad de redes de transporte*.

Principi, N. (2012). ANÁLISIS DE ACCESIBILIDAD E INTERACCIÓN ESPECIAL: CÁLCULOS CUANTITATIVOS Y REPRESENTACIÓN CARTOGRÁFICA A ESCALA REGIONAL. *GEOSIG*(4), 23-38.

Ramírez Cajigas, D. (Febrero de 2018). DISEÑO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS RUTAS DEL SISTEMA MIO DE ACUERDO CON LA CALIDAD DEL SERVICIO PERCIBIDO EN LA COMUNA 18. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Rodrigue, J. P., Comtois, C., & Slack, B. (2006). *THE GEOGRAPHY OF TRANSPORT SYSTEMS*. New York: Routledge.

Rodríguez Mariaca, D., Vivas Pacheco, H., Pinzón, M. A., & Jaramillo Molina, C. (2017). ACCESIBILIDAD A LOS CENTROS DE EMPLEO EN CALI POR MEDIO DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE MASIVO MIO. *El Observador Regional*(34), 1-7.

Santuario Torres, A. (2016). INFRAESTRUCTURA Y ACCESIBILIDAD PARA LA MOVILIDAD PEATONAL: FACTORES DE CAMINABILIDAD EN DOS ÁREAS HABITACIONALES DE TIJUANA, B.C., 2015. Tijuana, México.

Secretaría de Movilidad. (2017). *DOCUMENTO DE SOPORTE PARA ADOPCION DE MEDIDAS DE ORDENAMIENTO DEL TRANSITO*. Santiago de Cali: Alcaldía Municipal.

Steer Davies Gleave. (2015). *Encuesta de Movilidad Hogares 2015*. Santiago de Cali.

Subero Munilla, J. (2009). MÉTODOS DE ANÁLISIS DE LA EFICACIA ESPACIAL DE LAS REDES DE TRANSPORTE COLECTIVO DE INFRAESTRUCTURA FIJA, ENSAYO DE INDICADORES DE OFERTA. Barcelona.

Težak, S., Sever, D., & Lep, M. (2016). Increasing the capacities of cable cars for use in public transport. *Journal of Public Transportation*, 19(1), 1-16.

Titheridge, H., Achuthan, K., & Mackett, R. (2009). Assessing the extent of transport social exclusion among the elderly. *JOURNAL OF TRANSPORT AND LAND USE*, 2(2), 31-48.

University College London, & Universidad de los Andes. (2013). *Marco de Análisis de accesibilidad y equidad*. Bogotá.

V. H. (2016). IMPACTOS EN LA MOVILIDAD, EL ESPACIO PÚBLICO Y EL CONTROL SOCIAL EN EL PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE EN MEDELLÍN (2008-2015). Medellín, Antioquia, Colombia.

Valenzuela Montes, L. M., & Talavera García, R. (2015). Entornos de movilidad peatonal: una revisión de enfoques, factores y condicionantes. *EURE*, 41(123), 1-10.

Velásquez Villada, L. (2018). Impacto del proyecto de transporte tipo cable aéreo en la accesibilidad de la Ciudad de Pereira. Manizales, Caldas, Colombia.

Villar, J. (2017). EL ROL DEL TRANSPORTE INFORMAL EN SANTIAGO DE CALI ¿PROBLEMA U OPORTUNIDAD? *Papeles de Coyuntura*, 40, 40-77.

Vivas Pacheco, H. (2011). El desarrollo en 3D: las claves de las diferencias en la calidad de vida de las regiones. *CS*(7), 195-222.

Vivas Pacheco, H. (2011). SEGREGACIÓN RESIDENCIAL Y DISTANCIA SOCIOECONÓMICA EN CALI. (Centro de Estudios de Opinión UDEA, Recopilador) Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia.

Zapata Córdoba, D., Stanley, J., & Stanley, J. (2014). Reducing Social Exclusion in Highly Disadvantaged Districts in Medellín, Colombia, through the Provision of a Cable-Car. *COGITATIO*, 2(4), 1-13.