

Propuesta de clasificación de la red de cicloinfraestructura de la ciudad de Bucaramanga
aplicando la metodología Level of Traffic Stress (LTS)

Laura Natali Pinto Mendez y Yeison Ivan Ayala Nova

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil

Director

Yerly Fabián Martínez Estupiñán

Magister en Ingeniería Civil

Codirectora

Melissa Giseth Sanabria Pinto

Ingeniera Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida con éxito, rodeada de mis padres, Sandra Mendez y Flaminio Pinto, quienes fueron mi gran apoyo en este proceso y son mi mayor inspiración, los amo y estaré agradecida siempre por todos los sacrificios que han hecho para brindarme las mejores oportunidades. A mis tíos José Martínez y Lutbing Rojas por acogerme en su hogar durante mis primeros años de formación. A mi hermano Robinson Pinto y demás amigos y familiares, que cuando los necesité, siempre estuvieron ahí para ayudarme, los llevo en mi corazón. A la Universidad Industrial de Santander por brindarme los mejores educadores, que me forjaron como profesional, pero sobre todo como persona. Finalmente, a nuestros directores de proyecto, Yerly Martínez y Melissa Sanabria, por su dedicación, entrega y compromiso para con nosotros, Dios los bendiga.

Laura Pinto

Primeramente, doy gracias a DIOS por permitirme vivir la experiencia de estudiar algo que me apasiona como lo es la Ingeniería Civil, agradezco de corazón a nuestros directores, el Ingeniero Yerly Fabian Martínez Estupiñán y la Ingeniera Melissa Giseth Sanabria Pinto, por acompañarnos y guiarnos en este proceso, también a la Universidad Industrial de Santander por ofrecerme los espacios y docentes para mi formación, finalmente y no menos importante agradezco a mi familia por acompañarme durante esta etapa ya que con su amor y apoyo incondicional logré superar las dificultades que se presentaron.

Iván Ayala

Tabla de contenido

Introducción	10
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo general.....	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. Estado del arte.....	13
2.1 Revisión de la literatura	13
2.2 Selección y filtrado	15
2.3 Análisis de documentos	17
2.4 Identificación de variables aplicadas en las metodologías lts.....	21
3. Metodología	24
3.1 Caracterización de variables	25
3.2 Métodos de clasificación.....	26
3.3 Método de clasificación no supervisada	27
3.4 Método de clasificación seleccionado	29
4. LTS para la ciudad de bucaramanga.....	30
4.1 Variables	31
4.2 Formación de clústeres	36
4.2.1 Escenario 1.....	38
4.2.2 Escenario 2.....	42
5. Conclusiones y recomendaciones	46
Referencias bibliográficas.....	50
Apéndices.....	54

Lista de Tablas

Tabla 1. Documentos evaluados para el estudio de LTS	16
Tabla 2. Variables estudiadas según los documentos relacionados con LTS	23

Lista de Figuras

Figura 1. Documentos publicados por año	14
Figura 2. Documentos publicados por país.....	14
Figura 3. Análisis clúster	27
Figura 4. Mapa de anchos de calzada	33
Figura 5. Mapa de anchos de número de carriles.....	33
Figura 6. Mapa de rutas de tráfico pesado	34
Figura 7. Mapa de velocidad de operación de las vías	34
Figura 8. Mapa del flujo de vehículos livianos.....	35
Figura 9. Mapa de la red de ciclo vías implementadas en 2019	35
Figura 10. Mapa de clasificación de vías según su tipo.....	36
Figura 11. Clústeres recomendados por el método de la silueta.....	37
Figura 12. Clústeres recomendados por el método de suma de cuadrados.....	37
Figura 13. Distribución de los elementos por clúster escenario 1	38
Figura 14. Gráfico de radar con los valores medios de cada variable por clúster escenario 1	39
Figura 15. Clasificación LTS de vías para escenario 1	40
Figura 16. Mapa representativo de las vías restringidas para ciclo vías según POT	41
Figura 17. Mapa de la red de ciclo vías desarrolladas en el 2019	41

Figura 18. Distribución de los elementos por clúster escenario 2	42
Figura 19. Gráfico de radar con los valores medios de cada variable por clúster escenario 2	43
Figura 20. Clasificación lts de vías para escenario 2	44
Figura 21. Red de ciclo vías proyectadas para el año 2025 y 2030	45
Figura 22. Porcentaje de segmentos viales asignados a niveles de estrés de tráfico	46
Figura 23. Mapa de calor del uso de la bicicleta en Bucaramanga.....	48

Lista de Apéndices

Apéndice A. Documentos hallados mediante la ecuación de búsqueda en scopus	54
Apéndice B. Documentos hallados en las referencias	56
Apéndice C. Estadística de resultados para el escenario 1	57
Apéndice D. Estadística de resultados para el escenario 2	58
Apéndice E. Código utilizado en el software Rstudio para el análisis clúster.....	58

Resumen

Título: Propuesta de clasificación de la red de cicloinfraestructura de la ciudad de Bucaramanga aplicando la metodología Level of Traffic Stress (LTS)*

Autor: Laura Natali Pinto Mendez y Yeison Ivan Ayala Nova**

Palabras Clave: Métodos de clasificación, clúster, PAM, Level of Traffic Stress (LTS), cicloinfraestructura.

Descripción: En la presente investigación, a partir de un método de clasificación no supervisado, se determinó cuáles eran las vías de la ciudad de Bucaramanga que generaban mayor estrés para los usuarios en bicicleta, en la literatura a esto se le conoce como Nivel de Estrés del Tráfico o Level of Traffic Stress (LTS por sus siglas en inglés), y se presenta como una variable adicional que puede ser considerada en los análisis de la viabilidad para implementar ciclo-infraestructura en un determinado eje vial. La metodología se desarrolló en cuatro etapas: la primera consistió en la búsqueda, selección y normalización de las variables características de la malla vial, en la segunda etapa se calculó el número adecuado de clústeres que se debían generar para garantizar un adecuado agrupamiento de las variables, la tercera etapa desarrolló el Algoritmo de Partición en torno a Medoides o Partitioning Around Medoids (PAM por sus siglas en inglés) para realizar la clasificación de los segmentos viales en los diferentes clústeres, garantizando que las variables de cada clúster fueran similares entre sí y diferentes a las de los demás clústeres, y por último, la cuarta etapa consistió en etiquetar cada clúster con un nivel de LTS correspondiente. El resultado de la investigación permitió identificar altos niveles de estrés en algunos corredores que se eligieron para construir la ciclo-infraestructura actual y en las proyecciones para 2025 y 2030.

* Trabajo de Grado

** Facultad de ingenierías físicas y mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Yerly Fabian Martínez Estupiñán. Magister en Ingeniería Civil. Codirector: Melissa Giseth Sanabria Pinto. Ingeniera Civil

Abstract

Title: Proposal for the classification of the cycloinfrastructure network of the city of Bucaramanga applying the methodology Level of Traffic Stress (LTS) *

Author: Laura Natali Pinto Mendez y Yeison Ivan Ayala Nova **

Key Words: Classification methods, cluster, PAM, level of traffic stress (LTS), cycle-infrastructure.

Description: The present research shows an unsupervised classification method, determined which roads in the city of Bucaramanga generated the most stress for bicycle users. It is known as the Level of Traffic Stress (LTS). It can be an additional factor that should be considered to implement a bike lane in a city. The methodology was developed in four stages: the first consisted in the search, selection, and normalization of the characteristic variables of the road network, in the second stage, the adequate number of clusters to be generated to guarantee proper grouping of the variables was calculated, the third stage developed the Partitioning Around Medoids (PAM) algorithm to classify the road segments in the different clusters, ensuring that the variables of each group were similar to each other and different from those of the other clusters, and finally, the fourth stage consisted of labeling each cluster with a corresponding LTS level. The results showed high levels of stress in some corridors chosen to build the current cycle infrastructure and in the projections for 2025 and 2030.

* Degree Work

** Faculty of physicommechanical engineering. School of civil engineering. Director: Yerly Fabian Martínez Estupiñán. Master in Civil Engineering. Co-director: Melissa Giseth Sanabria Pinto. Civil engineering

Introducción

Los viajes urbanos que se realizan a pie o en bicicleta representan un poco más del 40% a nivel mundial (Pardo et al., 2018). Sin embargo, debido al contexto económico, social y cultural en América Latina, los planes urbanos que han estructurado algunas ciudades han producido una infraestructura ciclista limitada (Huertas et al., 2020). Donde el uso de la bicicleta se vincula generalmente con el deporte, el juego infantil o a la falta de recursos para alcanzar la motorización (Pardo y Sanz, 2016). Por otro lado, poco a poco las ciudades latinoamericanas han ido implementado políticas de transporte innovadoras, equitativas y sostenibles que promueven el ciclismo seguro (Ríos y Taddia, 2014). Aunque muy pocas agencias de planificación han desarrollado la estimación del Nivel de Estrés del Tráfico (Level of Traffic Stress) u otras metodologías de predicción de estrés para mejorar la práctica de planificación de infraestructura ciclista, y los estudios académicos son igualmente escasos (Tucker y Manaugh, 2018).

El LTS es un indicador que clasifica los componentes de una red de carreteras según el estrés que experimentan los ciclistas (Furth y Mekuria, 2016). Además, es usado para evaluar la idoneidad de las calles para bicicletas (Zuo et al., 2021). Un impedimento importante en la adopción de LTS en América Latina es que no tiene en consideración las características específicas en materia de seguridad ciclista que enfrentan las ciudades de la región (Hidalgo y Huizenga, 2013). Sin embargo, el potencial de los datos basados en LTS para mejorar la planificación de la red de ciclo-infraestructura no debe subestimarse.

Este documento presenta la aplicación de una metodología de clasificación de carreteras basada en LTS con datos de la red vial. El componente de agrupamiento presenta una forma rápida y eficiente de diferenciar segmentos similares de la red de carreteras y el componente interpretativo

asigna las etiquetas de LTS a los tramos de carreteras de acuerdo con las características que presenten. Finalmente se compararon los resultados de LTS con las vías de más usadas por los usuarios de bicicleta para comprobar si son consistentes con la literatura que relaciona LTS con vías preferenciales.

Este artículo está presentado de la siguiente forma: posterior a la introducción se encuentra la Sección 2, que muestra una revisión de la literatura con diferentes aplicaciones de metodologías LTS y las variables comunes utilizadas. La Sección 3 desarrolla la metodología de clasificación seleccionada. La Sección 4 presenta el caso de estudio en Bucaramanga. Finalmente, la Sección 5 concluye el documento y presenta algunas recomendaciones.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar el grado de pertinencia de los corredores seleccionados para la construcción de la cicloinfraestructura en la ciudad de Bucaramanga, a partir de un análisis de la aplicación de la metodología Level of Traffic Stress - LTS.

1.2 Objetivos Específicos

Realizar una revisión del estado del arte acerca de las aplicaciones de la metodología LTS, sus beneficios y perjuicios en la selección de corredores de cicloinfraestructura.

Identificar las vías restringidas para la construcción de cicloinfraestructura por el POT 2014-2027 y las diferentes variables que puedan afectar en los niveles de estrés que experimenta un bici-usuario en la red vial de la ciudad de Bucaramanga.

Agrupar las vías con características físicas similares teniendo en cuenta las variables seleccionadas para determinar el nivel de LTS en la red vial de Bucaramanga.

Identificar los corredores viales que ofrecen mejores condiciones para infraestructura de ciclorutas y confrontarlos con los existentes a partir de los resultados de la aplicación de la metodología LTS.

2. Estado del arte

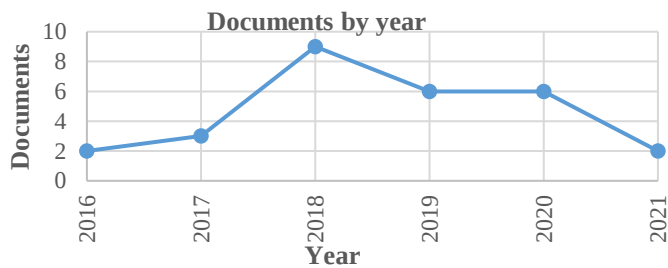
Para la elaboración del estado del arte en primer lugar, se realizó una revisión sistemática de la literatura con el fin de profundizar respecto al concepto, metodología y casos de aplicación de Level of Traffic Stress (LTS) y de esta forma identificar su eventual aplicabilidad para las condiciones de movilidad en la ciudad de Bucaramanga. El enfoque principal de la revisión de la literatura fue buscar artículos científicos que mostraran el desarrollo y aplicación de la metodología LTS para potencializar el uso de la bicicleta como modo de transporte (Pardo et al., 2018).

2.1 Revisión de la literatura

La revisión de la literatura en cualquier proyecto de investigación consiste en hacer una búsqueda sistemática y detallada que permita obtener una compilación literaria del conocimiento desarrollado en el campo específico de interés hasta el momento. Para este trabajo de investigación se realizaron consultas en las bases de datos que ofrece la Universidad Industrial de Santander, por medio del buscador SCOPUS, ya que esta reúne información de diversas bases de datos, formulando la ecuación de búsqueda "Level of Traffic Stress" AND (cyclist OR cycling OR bicycle). Por medio de este proceso se logró obtener 28 documentos relacionados con el tema de análisis. En la Figura 1 se observa que la información obtenida por este método es limitada y que las primeras investigaciones son del año 2016, siendo el 2018 el año donde más se documentó acerca de este tema.

Figura 1

Documentos publicados por año

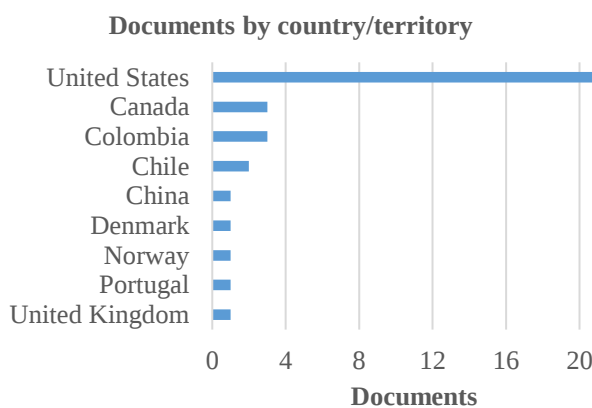


Nota: Representa la cantidad de documentos publicados por año que están relacionados con el tema de LTS hallados por el buscador SCOPUS

La Figura 2 muestra que la mayoría de los artículos son publicaciones de Estados Unidos, aunque su cifra sigue siendo relativamente pequeña ya que solo se encontraron 21 documentos, seguido por Canadá y Colombia con 3 documentos.

Figura 2

Documentos publicados por país



Nota: Representa la cantidad de publicaciones hechas por cada país relacionadas con LTS hallados con ayuda del buscador SCOPUS

Una de las principales razones por la que el número de publicaciones relacionadas con esta temática es bajo, en primer lugar, porque se trata de una metodología relativamente nueva (la primera publicación hallada bajo el nombre de LTS se realizó en el 2016 en el estado de California, EEUU), y además porque en los primeros años el concepto LTS se relacionaba el concepto de Nivel de Servicio (Level Of Service, LOS por sus siglas en inglés), por lo cual se estableció otra estrategia de búsqueda.

La nueva estrategia de búsqueda consistió en la revisión de los artículos y referencias citadas en los documentos hallados en el proceso anterior. Con esta estrategia se seleccionaron 8 documentos adicionales, 2 de los cuales correspondían a documentos de 1994 realizados en Estados Unidos que contenían información sobre los orígenes del tema de investigación.

2.2 Selección y filtrado

De los 28 documentos hallados por medio de la ecuación de búsqueda (véase Tabla 1 del Anexo A), se seleccionaron solo 10, presentados en la Tabla 1, descartando 18 que no realizaban una clasificación de las vías por niveles de estrés presentes, sino que usaban este concepto para relacionarlo, por ejemplo, con el efecto del uso de la bicicleta como conector en los viajes de la primera milla (distancia entre el lugar de partida y una red de transporte), y la última (distancia entre una estación de transporte y el lugar de destino) (Zuo et al., 2021). O simplemente usaban estudios de LTS realizados previamente en otra ciudad y posteriormente los asociaban con factores como la percepción de los usuarios mediante la aplicación de encuestas (Rodríguez et al., 2021) (Vallejo et al., 2020).

Además, en la lista de referencias de los documentos hallados mediante la ecuación de búsqueda, se encontraron 8 documentos (Apéndice B) nombrados en la Tabla 1 (Señalados con *) que desarrollaron principalmente una metodología de clasificación de vías de acuerdo con el nivel

de estrés, y se ajustan a nuestro objetivo de analizar el grado de pertinencia de los corredores seleccionados para la construcción de la actual cicloinfraestructura en la ciudad de Bucaramanga, o que sirven para comprender de manera más clara la importancia del análisis LTS, por lo cual, fueron tenidos en cuenta en la presente investigación, lo que finalmente resulta en 18 artículos que serán evaluados para el estudio de LTS.

Los 18 documentos descartados inicialmente, aunque no sirvieron de guía directa en la investigación, fueron útiles para entender los diferentes campos de estudio en los que podía aplicarse el concepto de nivel de estrés del tráfico.

Tabla 1

Documentos evaluados para el estudio de LTS

CÓDIGO	AÑO	AUTORES	PAIS/CIUDAD	¿SE IMPLEMENTÓ?
A*	1994	B. Epperson	N/a	No
B*	1994	A. Sorton y T. Walsh	Madison, EE.UU.	Sí
C*	1996	B. Landis	Washington, EE.UU.	No
D*	2014	R. A. Ríos y A. Taddia	América Latina y el Caribe	N/A
E*	2016	M. Lowry, P. Furth y T. Hadden-Loh	Seattle, EE.UU.	Sí
F*	2016	P. Furth, M. Mekuria y H. Nixon	San José, California	Sí
G*	2017	B. C. Council	Berkeley, California	Sí
H	2017	C. Chen, J. Anderson, H. Wang, Y. Wang, R. Vogt y S. Hernandez	Concord, Manchester, Nashua, Portsmouth, EE.UU.	No
I	2018	A. Caviedes y M. Figliozzi	Portland, EE.UU.	No
J*	2018	M. Berger y L. Dörrzapf	Vienna, Austria	No
K	2018	N. Zuniga, H. Ross y R. Machemehl	Austin, EE.UU.	Sí
L	2018	C. Bearn, C. Mingus y K. Watkins	Atlanta, EE.UU.	Sí
M	2018	L. Abad y L. Van der meer	Lisboa, Portugal	Sí
N	2019	A. F. Imani, E. Miller y S. Saxe	Toronto, Canada	Sí
O	2020	J. A. Vallejo Borda, D. Rosas Satizabal y A. Rodríguez Valencia	Bogotá, Colombia	No
P	2020	Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L.	Bogotá, Colombia	Sí
Q	2021	T. Zuo, H. Wei y N. Chen	Hamilton, Ohio, EE.UU.	Sí
R	2021	A. Rodríguez Valencia, J. A. Vallejo Borda, G. A. Barrero y H. A. Ortiz Ramirez		No

Nota: Se consignan los diferentes documentos que estaban relacionados con el tema de LTS y que fueron base para el desarrollo de la metodología

El análisis por nivel de estrés de tráfico o Level of Traffic Stress (LTS) fue un concepto creado por el Equipo de Plan de Bicicletas de Geelong en Australia en 1978, que inicialmente solo pretendía clasificar las vías en dos categorías, aptas o no aptas para usuarios de bicicleta (Sorton Y Walsh, 1994) . Actualmente lo que se pretende con un análisis por LTS es clasificar las vías en múltiples niveles al cuantificar el grado de estrés experimentado por el ciclista cuando transita por cada una de ellas, relacionando y analizando variables físicas de la vía y variables asociadas al tráfico. Generalmente estos niveles van de 1 a 4, donde los segmentos de vía que presenten un LTS1 son cómodos para todo tipo de ciclistas y los que se encuentren con LTS4 son segmentos adecuados solo para los ciclistas más experimentados (Lowry et al., 2016) (Huertas et al., 2020).

2.3 Análisis de documentos

El primer documento seleccionado corresponde a una publicación realizada por Bruce Epperson en 1994, donde se pretendía determinar el nivel de servicio de las vías aptas para los ciclistas a través de tres métodos matemáticos con características similares a las de un análisis por LTS. El primero de los tres métodos matemáticos analizados por Bruce fue realizado en 1987 por Davis en la universidad de Auburn, Alabama, Estados Unidos, en el cual se desarrolló un modelo que estimaba una calificación del índice de seguridad de la bicicleta o Bicycle Safety Index Rating (BSIR), dividiendo las carreteras en segmentos con condiciones similares de calzada y tráfico. Cada segmento fue evaluado utilizando un índice de segmento de carreteras o Roadway Segment Index (RSI) y cada intersección señalizada se evaluó con una función denominada índice de evaluación de intersecciones o Intersection Evaluation Index (IEI). La media ponderada de los RSI

y los IEI a lo largo de una ruta examinada indicaban el BSIR con un rango de 0 a 6, donde los segmentos calificados de 0 a 4 indicaban una condición excelente; 4 a 5, bien; 5 a 6, regular; y 6 en adelante, pobre.

El segundo método analizado fue una aplicación del modelo descrito anteriormente, pero ahora en las carreteras de la ciudad de Hollywood y el condado de Broward usando el RSI y eliminando el IEI, ya que cada segmento era identificado por las calles transversales que lo delimitaban y conservaban una puntuación individual denominada índice de estado de la calzada o Roadway Condition Index (RCI), hallado con el fin de establecer las condiciones existentes para el uso de la bicicleta en previsión de futuros planes para la misma.

Finalmente, el tercer método analizado fue planteado por la Organización de Planificación Metropolitana del Condado de Dade, Florida en 1993, que utilizaba una versión modificada de la función RCI. Varios de los cambios fueron influenciados por el trabajo realizado para un plan de instalaciones para bicicletas en el condado de Hillsborough, Florida, por Sprinkle Consulting Engineers de Tampa, con el objetivo de establecer una evaluación multimodal de la red de transporte del condado. Los resultados del RCI se usaron para clasificar las vías como aptas para ciclistas sin experiencia (valores menores a 4.0) y aptas solo para ciclistas experimentados (valores menores a 5.0) (Epperson, 1994).

En el mismo año (1994) Alex Sorton y Thomas Walsh afirmaron que los ciclistas no solo optan por tomar la ruta más corta o con una menor pendiente, sino que también evitan transitar junto con vehículos automotores; es decir, que no solo buscan minimizar el esfuerzo físico del recorrido sino también reducir el estrés mental que las condiciones de la vía y del tráfico le generen (Sorton y Walsh, 1994).

Más adelante, en 1996, Bruce Landis quiso cuantificar la percepción que tenía el ciclista del nivel de peligro al interactuar con vehículos de motor, para lo cual usó 2 metodologías; Interaction Hazard Score (IHS) con datos de tráfico para determinar la percepción del ciclista al interactuar con los vehículos automotores y Latent Demand Score (LDS) que busca analizar la cantidad de viajes en bicicleta que podría esperarse en determinada zona, teniendo en cuenta distancia y atractivos de viaje (Landis, 1994).

Varios años más tarde, en 2014 el Banco Interamericano de Desarrollo publicó una guía para impulsar el uso de la bicicleta con el objetivo de exponer el panorama actual sobre la bicicleta como medio de transporte urbano en diferentes ciudades de América Latina y El Caribe, describiendo los elementos y procesos necesarios para la formulación de una política ciclo-inclusiva e identificando los elementos principales para mejorar las condiciones del ciclismo urbano en la región. También se incluyeron casos de éxito en ciudades como Bogotá, Ciudad de México, Río de Janeiro, Rosario y Santiago de Chile en la implementación y fortalecimiento de políticas ciclo-inclusivas (Rios y Taddia, 2014). Aunque en esta guía no se desarrolló una metodología que buscara hallar específicamente el estrés representativo de una vía, para esta investigación sirve como referencia en los lineamientos necesarios en pro al fortalecimiento de una política ciclo-inclusiva en las ciudades.

En el 2016 en la ciudad de Seattle, Estados Unidos se implementó un método para clasificar el estrés de la bicicleta utilizando tasas marginales de sustitución usadas comúnmente a través de la investigación empírica sobre la elección de la ruta ciclista. El método fue programado como una herramienta de información geográfica y requiere datos comúnmente disponibles. La herramienta produce clasificaciones de prioridad basadas en la capacidad de un proyecto para mejorar la conectividad de bajo estrés entre hogares y destinos importantes. El análisis identifica áreas y

vecindarios específicos de los que se puede esperar que exhiban una mejor movilidad en bicicleta (Lowry et al., 2016).

Dos años más tarde, en el 2018 en las ciudades de Portland en Estados Unidos y Viena en Austria buscando desarrollar el concepto LTS se creó una metodología de evaluación del estrés experimentado por los ciclistas frente a diferentes situaciones que se presentaban en la vía, con ayuda de medidores cardiacos, cámaras, GPS y otras tecnologías. En estos estudios se evidenció que los niveles de estrés se elevaban cuando un ciclista se enfrenta a situaciones como cruzar una intersección, transitar por una vía irregular y/o con presencia de vehículos automotores. En cambio, cuando existe una ciclo-infraestructura exclusiva para bicicletas y es poco frecuente la interacción con tráfico automotor el ciclista experimenta bajos niveles de estrés (Caviedes y Figliozzi, 2018) (Berger y Dorrzapf, 2018).

La metodología LTS, no solo ha sido utilizada para determinar si las vías son adecuadas para ser transitadas por los usuarios de bicicletas, también existen casos como el de Toronto-Canadá donde se relacionó el nivel de estrés de las vías, como un factor determinante en la selección del medio de transporte de la población para llegar a sus puestos de trabajo (Imani et al., 2019). Otro caso fue en Suramérica, en la ciudad de Bogotá, donde grupos de estudio de la universidad de los Andes implementaron la metodología LTS para clasificar la malla vial de Bogotá. A través de un análisis de clústeres se agruparon las vías de la ciudad con características similares y posteriormente se les asignó un nivel de LTS. Además, se compararon los datos obtenidos con el índice de accidentalidad en bicicleta, donde se pudo evidenciar que el número de colisiones no mortales por kilómetro es mayor en los tramos de carretera clasificados como LTS altos, en consecuencia, los tramos dentro de las clasificaciones de LTS bajos mostraron cifras menores de siniestros viales (Huertas et al., 2020). Situación que también se pudo evidenciar en

un estudio enfocado en la accidentalidad de bicicletas implementado en las ciudades de Concord, Manchester, Nashua y Portsmouth, ciudades de estados unidos (Chen et al., 2017).

Varias ciudades de Estados unidos han implementado la clasificación LTS en la selección de vías para nuevas infraestructuras ciclistas, esto se debe en gran parte a que la información para desarrollar la metodología se considera de fácil acceso (Zuniga et al., 2018). Además, se evidencia que no solamente la metodología ha servido para asignar vías aptas para bici usuarios, sino que ha generado nuevos enfoques de estudio, como el caso de Bogotá, relacionando la accidentalidad de bici usuarios con el nivel LTS de las vías, o el caso de Toronto donde se relacionó el LTS con la disposición de los habitantes a hacer uso de la bicicleta. De acuerdo con lo anterior, se considera de gran importancia implementar este tipo de análisis en la ciudad de Bucaramanga la cual ha iniciado en la conformación de su red de ciclovías y actualmente cuenta con la estrategia para la bicicleta que propone su expansión para los años de 2025 y 2030, conectando a Bucaramanga con Girón, Floridablanca y Piedecuesta desarrollado el centro de investigación Despacio.org en 2018.

2.4 Identificación de variables aplicadas en las metodologías LTS

Para la identificación de las variables que fueron usadas para determinar el nivel de estrés presente en las vías de la ciudad de Bucaramanga solo se tuvieron en cuenta las 10 investigaciones que se implementaron según lo descrito en la Tabla 1. De las investigaciones se pudo evidenciar que algunas de las variables usadas en cada metodología se repiten, como fue el caso del ancho de calzada, número de carriles y velocidad de operación en la vía. Sin embargo, la mayoría de estas variables relevantes están asociadas a las condiciones físicas de la vía y el no tener en cuenta variables relacionadas con características del tráfico puede generar resultados de LTS que no son coherentes con la condición real de la infraestructura y la percepción de los ciclistas (Council, 2017) (Bearn et al., 2018).

Es así como en las ciudades de Lisboa en Portugal y Toronto en Canadá se analizó la variable tipo de vía, que hacía referencia a la clasificación de las vías según su uso e importancia para la conectividad, (primaria, secundaria, terciaria, local o peatonal) (Imani et al., 2019) (Abad y Meer, 2018). Por otra parte, estudios como los realizados en Berkeley, Toronto y Bogotá incluyeron la presencia de infraestructura ciclista dentro del análisis para identificar si una vía cuenta con infraestructura segregada que permita separar físicamente los ciclistas del tráfico automotor (Huertas et al., 2020) (Council, 2017) (Imani et al., 2019).

En la metodología aplicada en San José, Austin y Ohio, en Estados Unidos, se tuvo en cuenta una variable poco común, bloqueos de la ciclo-infraestructura, esto con el fin de caracterizar las obstrucciones físicas que se podrían presentar en el carril de bicicletas, presentándose principalmente en las vías de zonas comerciales (Furh et al., 2016).

Un caso particular fue el de Bogotá en Colombia donde se analizaron distintas variables relacionadas con el tránsito vehicular, entre las cuales estaban: densidad de tráfico, que indicaba el número medio de vehículos en un tramo de carretera por unidad de longitud, flujo de tráfico, que representaba el número de vehículos que atraviesan un segmento de carretera por unidad de tiempo e índice de congestión que relaciona el tiempo de recorrido promedio y el tiempo de recorrido a flujo libre en un segmento de vía (Huertas et al. , 2020). En la Tabla 2 se presentan las variables encontradas, la unidad de medida y cuáles fueron los estudios que las aplicaron usando el código asignado en la Tabla 1.

Tabla 2*Variables estudiadas según los documentos relacionados con LTS*

	VARIABLE	UNIDAD	FUENTE
Físicas	Ancho de vía	Metros	B,C,D,J
	Número de carriles	N/A	B,C,D,E,H,I,J
	Presencia de infraestructura ciclista	N/A	D,H,F,I
	Tipo de vía	N/A	G,E,H
	Bloqueos de ciclo infraestructura	N/A	F,K,Q
	Ancho carril	Metros	B
	Carril de estacionamiento	N/A	L,K,Q
Tránsito	Densidad de tráfico	Veh/km	P
	Flujo de tráfico	Veh/hora	B,P
	Índice de congestión	N/A	P
	Trafico promedio diario	Veh/día	G
	Velocidad de operación	Km/hora	B,F,L,M,N,Q
	Presencia de vehículos pesados	N/A	M,P
	Velocidad promedio de los vehículos	Km/hora	E,K,P

Nota: La tabla contiene las variables que han sido objeto de estudio en los diferentes documentos encontrados en la tabla 1

De acuerdo con lo anterior, sobresalen 3 variables que por la cantidad de artículos donde han sido aplicadas, se infiere que son fundamentales para el análisis LTS. Dichas variables fundamentales son: ancho de vía, número de carriles y velocidad de los vehículos. Sin embargo, la selección total de variables usadas en el análisis depende en gran medida de la disponibilidad

de datos en el lugar de aplicación, cuanta más información sea posible recopilar, más preciso serán los resultados.

Una vez se logró identificar cuáles eran las variables más importantes de las metodologías halladas en los artículos presentados y realizar una exhaustiva búsqueda de información disponible sobre la malla vial de la ciudad de Bucaramanga, se determinó que la metodología aplicada en la presente investigación será la desarrollada por los autores J. Huertas, A. Palacio, M. Botero, G. Carvajal, T. Van Laake, D. Higuera Mendieta, S. Cabrales, L. Guzman, O. Sarmiento y A. Medaglia en la ciudad de Bogotá-Colombia (Huertas et al. , 2020). Por tratarse de una aplicación realizada en nuestro país y demostrar su efectividad. Sin embargo, durante el desarrollo de la investigación se identificaron y definieron variaciones con respecto a la cantidad de variables analizadas ya que se ajustaron a la información disponible en la ciudad de Bucaramanga.

3. Metodología

Inicialmente se establecieron las variables representativas de la malla vial perteneciente al casco urbano de la ciudad de Bucaramanga que fueran útiles para el análisis de LTS según los estudios analizados previamente en la revisión del estado del arte. Se recopiló la información de las variables y se decidió que para ser precisos en los resultados se debía desarrollar la metodología en dos escenarios; uno en el que no se tuviera en cuenta la presencia de ciclo-infraestructura actual (proyectada para el 2019 según el plan de movilidad), ya que con la asignación de este atributo no sería posible determinar la conveniencia de su elección. Sin embargo, como es algo que ya está en funcionamiento, el segundo escenario fue tenerla en cuenta y evaluar la pertinencia de las proyecciones para 2025 y 2030. La clasificación de los segmentos en diferentes grupos se realizó

con un análisis de clústeres usando el software de programación R, ya que este cuenta con acceso libre y dispone de un gran número de librerías útiles para la evaluación de modelos estadísticos y las representaciones gráficas. El componente interpretativo de la metodología asignó una categoría LTS a cada grupo en función del contexto específico del lugar. Finalmente los resultados del análisis se compararon con las restricciones asociadas a la implementación de carriles segregados y compartidos para bicicletas, dadas por el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) vigente para la ciudad en cuestión y se analizó la correlación con las vías que el plan de movilidad Estrategia para la bicicleta proyectó para el 2019, 2025 y 2030 ya que el objetivo principal de la investigación fue analizar la pertinencia de los carriles para bicicletas actuales y proyectados para la ciudad de Bucaramanga según el nivel de estrés que presentan.

3.1 Caracterización de variables

En esta investigación se analizaron siete variables consideradas factores de estrés para los ciclistas y utilizadas en la mayoría de las metodologías de LTS descritas en la Sección 2.4 En el conjunto de variables, tres representan los factores físicos de los segmentos viales y cuatro representan las condiciones del tráfico. A continuación, se presenta una breve descripción de las siete variables, comenzando con las cuatro variables que describen los factores físicos, seguido por las tres que representan el tráfico vial.

Ancho de calzada: Es una variable continua con valores que van desde 1 metro para algunas vías peatonales, hasta 23 metros en vías primarias.

Número de carriles: Es una variable discreta, que indica el número de carriles presentes en la calzada, con valores que oscilan entre 1 a 4.

Presencia de infraestructura ciclista: Indica los tramos viales con presencia de ciclo-infraestructura actual y aquellos contemplados en el plan de movilidad de Bucaramanga para los próximos años.

Presencia de vehículos pesados: Es una variable nominal que indica la circulación de vehículos de carga pesada o articulados de metrolínea.

Velocidad de operación: Es una variable discreta ligada con el tipo de vía, donde las vías catalogadas como primarias tienen velocidades de 60km/h, las secundarias de 50km/h, las terciarias de 40km/h, red local 1 de 30km/h y red local 2 de 25km/h.

Flujo de tráfico: Es una variable continua que representa el número de vehículos que atraviesan un segmento de carretera por unidad de tiempo.

Tipo de vía (r): Es una variable nominal que indica la importancia de la vía en términos de movilidad, se distinguen entre primarias, secundarias, terciarias, red local y peatonales.

3.2 Métodos de clasificación

Los métodos de clasificación se dividen en dos grandes grupos, clasificación supervisada y no supervisada y su diferencia principal radica en que los métodos de clasificación supervisada usan clústeres con datos de entrenamiento para hacer predicciones y clasificar los datos de entrada, por el contrario, los métodos no supervisados crean los clústeres a partir de las características de los datos de entrada (Cornuéjols et al., 2018). Particularmente para la presente investigación no se contaba con una clasificación previa ya que es la primera vez que se aplica este tipo de metodologías para clasificar la red vial en Bucaramanga, por lo cual, los métodos de clasificación supervisada fueron descartados inicialmente.

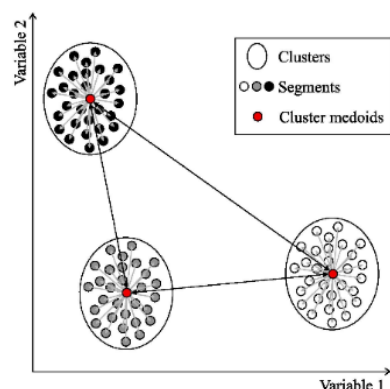
3.3 Método de clasificación no supervisada

Entre los métodos más usados de clasificación no supervisada se encuentra el análisis de clústeres, el cual se basa en un conjunto de técnicas multivariantes que buscan agrupar objetos en conjuntos de acuerdo con sus atributos, de tal forma que cada clúster contenga elementos que sean similares entre sí. Para poder agrupar los datos, es necesario determinar la distancia de similitud, es decir, que tan similares deben ser los elementos dentro de un clúster, esto es posibles mediante el uso de ecuaciones como la distancia euclídea, de Minkowski o la métrica de Chebychev (Hastie et al. ,2008).

La Figura 3 es un ejemplo esquemático que representa el funcionamiento de un análisis por clústeres. Muestra segmentos de carreteras con dos variables donde visualmente es posible identificar tres grupos basados en estas dos variables. Los segmentos dentro de un grupo determinado comparten rasgos similares y son diferentes de los de los otros dos grupos (Huertas et al., 2020).

Figura 3

Análisis Clúster



Nota: la figura representa el agrupamiento de elementos para cada medoide, tomada de Level of traffic stress-based classification: A clustering approach for Bogotá, Colombia por Huertas, J., Palacio, A., Botero, M., Carvajal, G., Van Laake, T., Higuera Mendieta, D y Medaglia, A. (2020).

Una vez determinada la distancia de similitud es necesario elegir un tipo de algoritmo de clasificación, estos se pueden subdividir en dos grupos, jerárquicos y no jerárquicos. Los jerárquicos establecen un orden entre las agrupaciones, es decir se van uniendo en función de la mayor o menor proximidad de los individuos entre sí, acá es posible encontrar métodos como vecino más próximo, el cual agrupa elementos que tienen menor distancia de similitud y el método Ward, que busca minimizar la varianza intragrupos, partiendo de elementos individuales y uniéndolos uno por uno entre los que tengan la menor varianza posible (Hastie et al., 2008).

Los métodos no jerárquicos generan agrupamientos a partir de maximizar o minimizar algún criterio, pero a diferencia de los métodos jerárquicos el número de clústeres es determinado por el usuario (Hastie et al., 2008). Lo cual fue preciso para analizar los datos de la presente investigación porque permitió limitar el número de clústeres y relacionarlos directamente con un nivel de estrés del tráfico para asegurar su correcta interpretación. Dentro de los métodos no jerárquicos más comunes se encuentra en K-Means, el K-Medoids y la Cuantificación Vectorial, por mencionar algunos.

El algoritmo K-means inicia eligiendo un número de centroides igual al número de agrupamientos que haya sido señalado, cada elemento es asignado a su centroide más cercano de acuerdo a su distancia de similitud, formando así agrupamientos. Una vez formados los clústeres se recalcula el centroide como el promedio de todas las variables se le asignaron, el proceso se repite hasta que los elementos no cambien de agrupamiento o alcancen cierto número de interacciones (Hastie et al., 2008).

Otro algoritmo de agrupación es el K-medoids que, en lugar de usar centroides, usa medoides, en otras palabras, asigna como referencia elementos ya existentes dentro del conjunto de datos. El uso de elementos como referencia hace que este algoritmo sea menos sensible a datos

atípicos (outliers) ya que el mediano a diferencia del centroide usado en K-means, es un valor presente en el clúster y no un promedio (Hastie et al., 2008).

La cuantificación vectorial trabaja en bloques de datos, en lugar de datos aislados, y dichos bloques pueden ser representados por vectores. Es un método comúnmente usado en el análisis de datos con pérdidas y funciona dividiendo un gran conjunto de puntos (vectores) en grupos que tienen aproximadamente el mismo número de puntos más cercanos a ellos, donde cada grupo está representado por su punto centroide, como en K-means (Hastie et al., 2008).

3.4 Método de clasificación seleccionado

A partir de la revisión de información referente a los diferentes métodos de clasificación, se optó por usar el algoritmo K-medoids implementado mediante el software de programación R, ya que este método permite realizar agrupaciones con precisión (95% más precisión con respecto a otros métodos)(Huertas et al. , 2020) de clasificación para estudios donde los valores de cada variable difieran entre sí, como los relacionados con tramos de carreteras en función de variables físicas y operacionales como las que fueron descritas en la Sección 3.1 de este documento. Además, es posible reforzar su efectividad teniendo en cuenta el estudio realizado en Bogotá (Huertas et al., 2020). El cual aplicó de manera exitosa este método en un análisis similar para la malla vial de esta ciudad, con resultados coherentes y que dejaban ver un gran potencial de la metodología para usos similares analizando otras ciudades.

Para la adaptación del método de clasificación a las condiciones propias de esta investigación, inicialmente se realizó un proceso de normalización de las variables para tener una escala de medida estándar y evitar sesgos en el proceso de comparación (Brown, 2008). Esto se realizó a través del método de puntuación Z donde el valor estandarizado (x') se calcula restando a cada valor (x) la media de la muestra (μ) y dividiendo en la desviación estándar (σ), así:

$$x'=(x-\mu)/\sigma.$$

En el software RStudio esto se hizo a través de la función “scale”. Luego se calculó una matriz de distancia que determina la similitud entre los atributos de cada tramo de vía (Franklin, 2005) utilizando el método Kendall a través de la función `get_dist`, que permite calcular las semejanzas entre los tramos de vía. Después se estimó el número de clústeres más adecuados según la base de datos usando la función `fviz_nbclust` que determina y visualiza el número óptimo usando diferentes métodos, como la suma de cuadrados y la silueta media. Posteriormente para el análisis de clústeres se usó el algoritmo Partitioning Around Medoids (PAM) del método K-medoids. Este algoritmo es conocido por ser uno de los más robustos y trabaja con variables continuas y discretas (Sang y Jun, 2009). PAM proporciona un gran número de estadísticas que permiten una investigación exhaustiva de los resultados de la agrupación y se caracteriza por usar medoides (objetos dentro de los conjuntos para los cuales la diferencia media con todos los demás objetos es mínima), diámetros y separaciones de los clústeres, adicionalmente realiza una representación gráfica de los clústeres mediante las llamadas siluetas (Kaufman y Rosseeuw, 1990). Por defecto, cuando los medoides no se especifican, el algoritmo busca primero un conjunto inicial de medoides (esto se llama fase de construcción).

4. LTS para la ciudad de Bucaramanga

En esta sección se detalla el proceso realizado para obtener la clasificación de la malla vial de la ciudad de Bucaramanga de acuerdo con los niveles de estrés que representarían para los ciclistas y las recomendaciones de uso asociadas a cada nivel como se indica en la Tabla 3

4.1 Variables

La gran mayoría de las variables usadas en este análisis fueron obtenidas mediante información recopilada en los últimos 10 años por el grupo de investigación de Geomática de la Universidad Industrial de Santander, el cual a través de sus proyectos de investigación y consultoría a lo largo del tiempo ha recopilado información acerca de las características físicas y operacionales de la red vial de Bucaramanga y su área metropolitana. La información fue suministrada en diferentes capas en formato shape (.shp) que contenían los tramos viales de la ciudad de Bucaramanga con características como el tipo de vía según el POT, el número de carriles, el ancho de calzada, las rutas del Sistema Integrado de Transporte Masivo Metrolínea y las demás rutas colectivas. Las vías relacionadas con presencia de vehículos pesados fueron las troncales y pretroncales del metrolínea y aquellas por donde se movilizan vehículos de carga como la Avenida Quebrada seca y la Vía al Mar, las demás vías se identificaron con un 0 en la tabla de atributos.

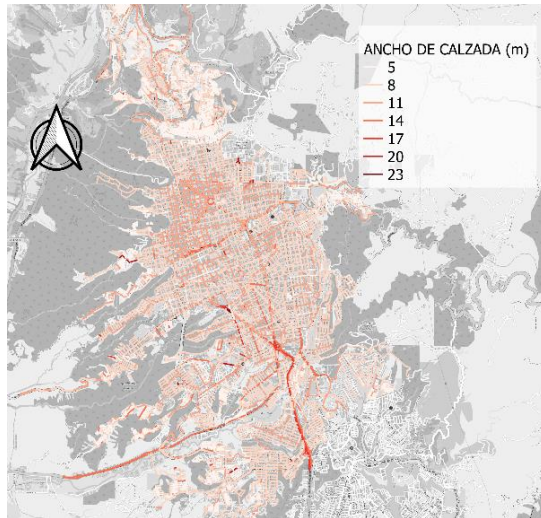
El flujo de tráfico usado fue el de la hora pico, de 6:00 a 7:00 PM, el cual es resultado de un modelo de asignación dinámica utilizando herramientas de micro simulación en el desarrollo de una tesis de maestría (Báez et al., 2021). Realizada en el grupo de Investigación de Geomática de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander. La identificación de los carriles con presencia de ciclo infraestructura para ciclistas actualmente y a futuro se obtuvo de la propuesta hecha en el documento La bicicleta como medio de transporte: Estrategia 2019-2030 para Bucaramanga y su Área Metropolitana (Pardo et al., 2018). Finalmente, la velocidad de operación fue asignada de acuerdo con información tomada del Plan Maestro de Movilidad de Bucaramanga según el tipo de vía dado por el POT vigente en la ciudad para el periodo del 2014 al 2027 (Plan maestro, 2010).

El manejo de las diferentes variables se realizó por medio del software QGis, en el cual, con el fin de unificar los datos de la red vial, se creó una capa cuya tabla de atributos contuviera todas las variables, y aquellas que fueran categóricas como la presencia de vehículos pesados, el tipo de vía y la presencia de infraestructura ciclista fueron identificadas con números. Los tramos viales con presencia de vehículos pesados o infraestructura ciclista se identificaron con un 1, y los que no presentaron estas condiciones se les asignó un 0. En el caso del tipo de vía, las vías primarias fueron identificadas con el número 1, las vías secundarias con el 2, las vías terciarias con el 3, las pertenecientes a la red local de nivel 1 con el 4, red local 2 con el 5 y peatonales con el 6. Esto con el fin de facilitar la manipulación de los datos en el análisis por clústeres.

Las Figuras 4,5,6,7,8,9,10 muestran los rangos de valores de las siete variables para los tramos viales del área urbana de la ciudad de Bucaramanga, y es posible observar que las vías más anchas, con mayor número de carriles, con presencia de tráfico pesado, con mayores velocidades de operación y con mayor flujo de tráfico se encuentran en las arterias principales como la vía Bucaramanga-Floridablanca y la Avenida Quebrada seca. Por el contrario, las calles residenciales tienden a ser más estrechas, sin presencia considerable de vehículos pesados, velocidades de operación bajas y bajo flujo de tráfico.

Figura 4

Mapa de anchos de calzada

**Figura 5**

Mapa de anchos de número de carriles

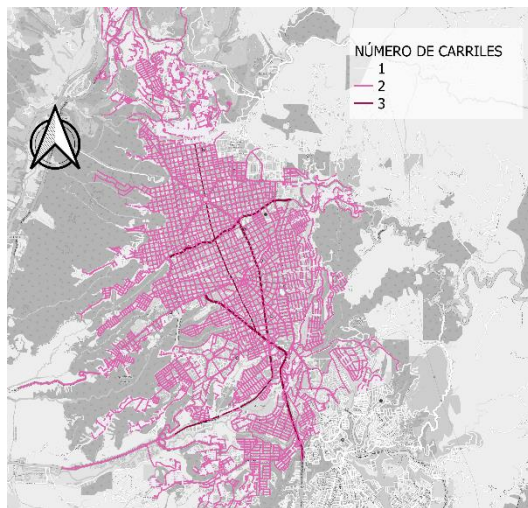
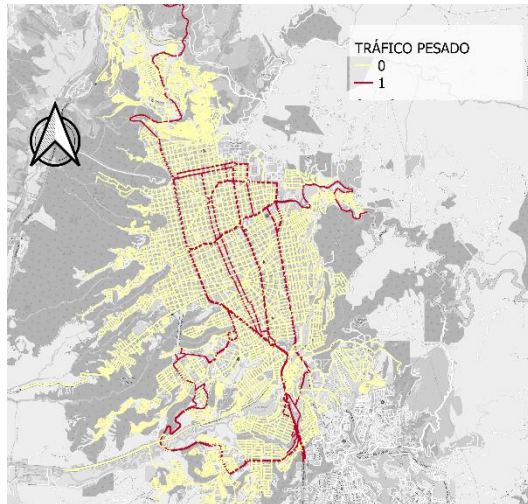


Figura 6

Mapa de rutas de tráfico pesado

**Figura 7**

Mapa de velocidad de operación de las vías

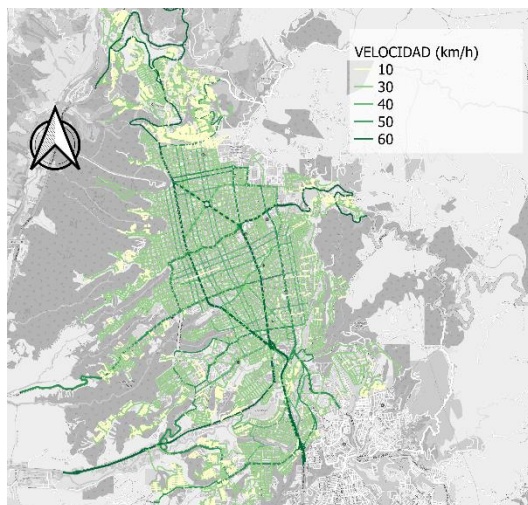
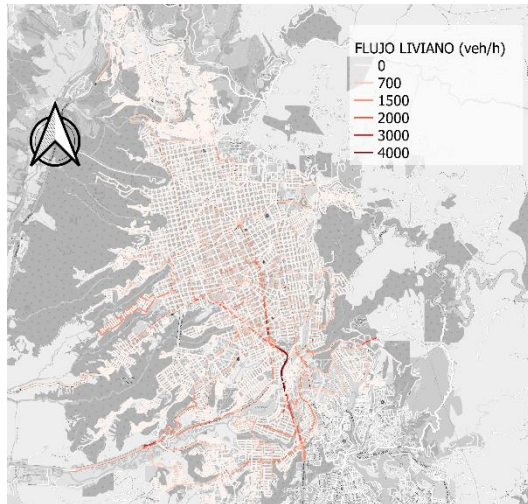


Figura 8

Mapa del flujo de vehículos livianos

**Figura 9**

Mapa de la red de ciclo vías implementadas en 2019

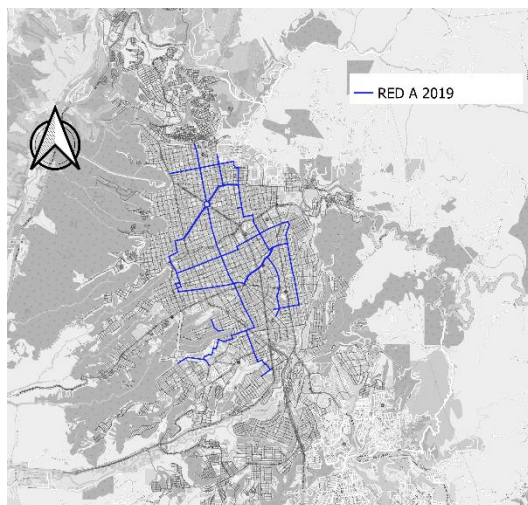
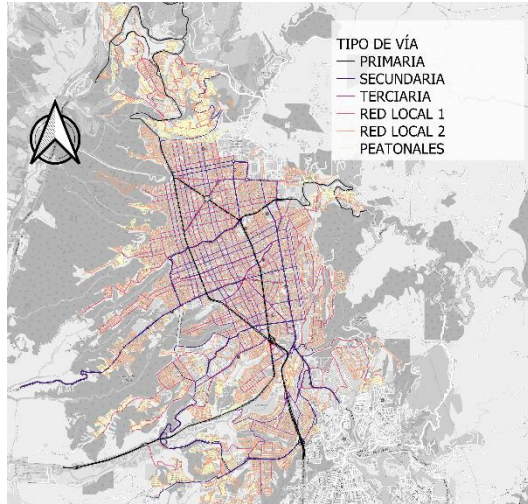


Figura 10

Mapa de clasificación de vías según su tipo



4.2 Formación de clústeres

Dada la gran cantidad de segmentos en una red de carreteras, el algoritmo PAM exige importantes recursos computacionales y lleva mucho tiempo clasificar una ciudad o geografía completa (Miller y Han, 2009). Para reducir los recursos demandados y los requisitos de tiempo, se omitió la variable del tipo de vía ya que esta se encontraba relacionada directamente con la velocidad, por lo cual su inclusión en el análisis de datos resultaba redundante.

Inicialmente se realizó una etapa de entrenamiento del algoritmo PAM del método K-medoids en el software de programación RStudio para agrupar los tramos de vía con características similares. El método requiere como dato de entrada un número inicial de clústeres que debe generar. Para poder determinar con precisión este número se usó el método de la silueta media que relaciona, para cada elemento, la distancia al grupo asignado con la distancia a los otros grupos. Esta situación se maximiza en el momento que se alcance el número de clústeres óptimos para un

conjunto de datos (Rosseeuw, 1987). Los resultados se muestran en la Figura 11 y se puede evidenciar claramente que el número inicial son cuatro clústeres.

Adicionalmente se usó el método de la suma de cuadrados, en el cual se calcula la distancia promedio del centroide a todos los puntos del clúster. Así, cuando se va de una situación en la que el número de clústeres es inferior al correcto a una situación en la que el número es el adecuado, el valor de la dispersión disminuye bruscamente, mientras que, si aumenta el número de clústeres al adecuado, el valor de la dispersión se reducirá más lentamente, formando un codo en la gráfica (Kaufman y Rosseeuw, 1990). Los resultados del análisis se ilustran en la Figura 12 y se puede interpretar que la sugerencia también es cuatro, ya que corresponde al punto de quiebre de la curva.

Figura 11

Clústeres recomendados por el método de la silueta

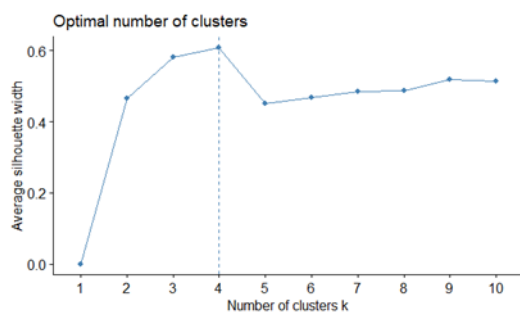
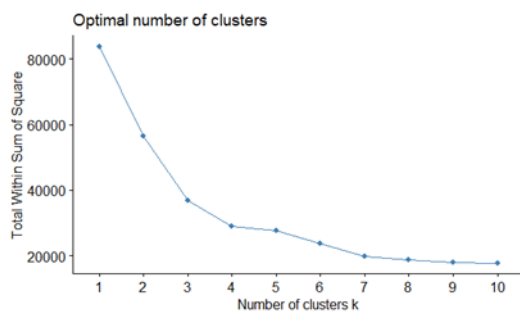


Figura 12

Clústeres recomendados por el método de suma de cuadrados



Una vez definido que el algoritmo PAM debería generar cuatro clústeres, se corrió el método en dos escenarios.

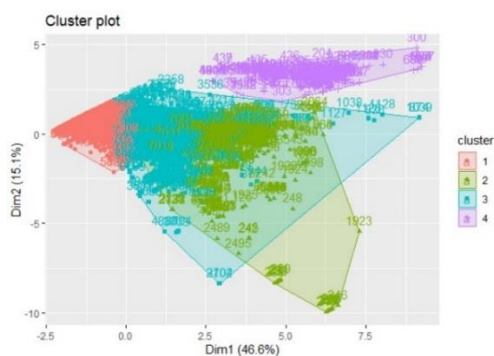
4.2.1 Escenario 1

El primer escenario tiene como finalidad identificar el nivel de estrés que presentaban las vías antes que fuera construida la actual ciclo-infraestructura de la ciudad de Bucaramanga, para lo cual fue necesario omitir la variable de ciclo-infraestructura construida, y de este modo simular las condiciones de la malla vial en el momento de la planeación de estos carriles.

Por lo tanto, las variables con las cuales se corrió el método para el primer escenario fueron el ancho de calzada, número de carriles, velocidad de operación, presencia de tráfico pesado y flujo de vehículos livianos, buses y camiones. En la Figura 13 se ilustran los cuatro clústeres generados por el software RStudio y es posible deducir que en el clúster 1 (rojo) se encuentran datos con dispersiones menores, en comparación con los clústeres 2 (verde) y 3 (azul).

Figura 13

Distribución de los elementos por clúster escenario 1



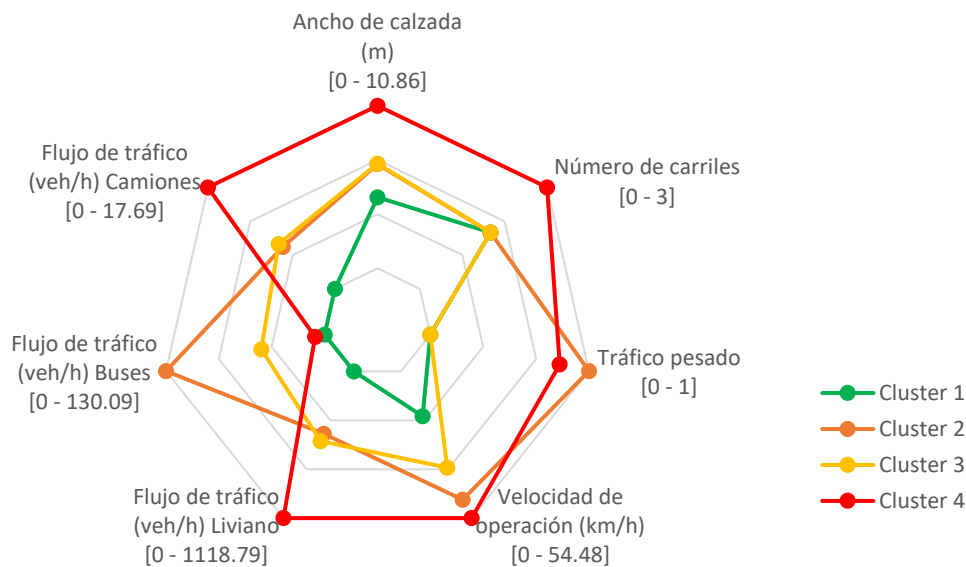
Nota: El grafico representa la distribución de los elementos para los 4 clúster generados por medio del software RStudio

Para asignar la categoría apropiada de LTS a cada clúster, se analizaron las estadísticas descriptivas de cada uno bajo el criterio de que los conjuntos con valores de ancho de calzada y

número de carriles más altos, y a su vez velocidades y flujos de tráfico más bajos, implicarían un LTS más bajo (mejores condiciones). En consecuencia, un clúster con una fracción mayor de segmentos con presencia de vehículos pesados indicaría un LTS más alto (Zuniga et al., 2018). En el apéndice C se presentan las estadísticas resumidas para los tramos viales de cada clúster y en la Figura 14 se ilustra esta información mediante un gráfico de radar, donde cada vértice del gráfico representa una de las cinco variables y junto al nombre de la variable, se muestra el rango para el valor promedio.

Figura 14

Gráfico de radar con los valores medios de cada variable por clúster escenario 1

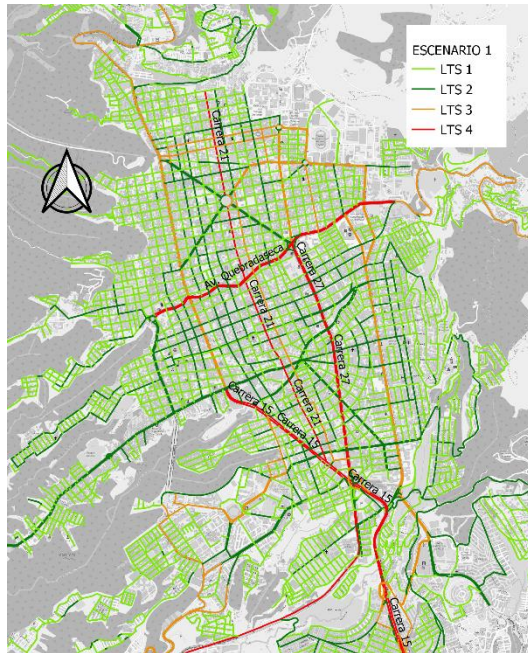


Con base en las estadísticas obtenidas se asignaron índices de LTS a cada clúster como se muestra en la Figura 15. Los tramos viales pertenecientes al clúster 1 fueron clasificados con LTS 1 (color verde claro), es decir, estos ofrecen mejores condiciones para el tránsito de todo tipo de bici usuarios, los del clúster 3 se relacionaron con LTS 2 (color verde oscuro), clúster 2 con LTS 3 (color naranja) y el clúster 4 con LTS 4 (color rojo), siendo estos últimos los que representan

mayor estrés para los usuarios de bicicleta y se recomienda su uso solo para usuarios experimentados.

Figura 15

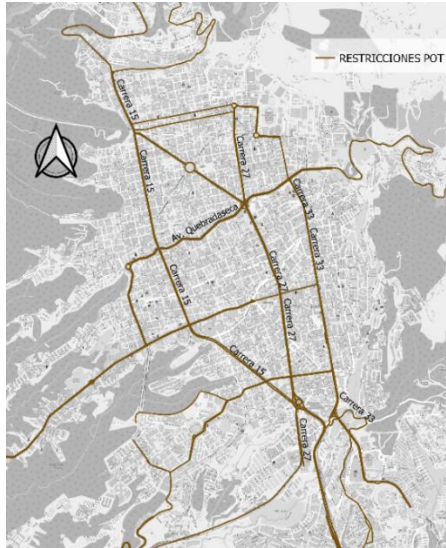
Clasificación LTS de vías para escenario 1



Una vez clasificadas las vías con sus respectivos niveles de estrés, se hizo una superposición de los resultados con los corredores restringidos para construir ciclo-infraestructura, indicados en el POT vigente para la ciudad de Bucaramanga en el periodo del 2014 al 2027 (Figura 16) , y se pudo evidenciar que corredores como la Carrera 27, la Avenida Quebradaseca y la Carrera 15, aunque por normativa no están disponibles para la construcción de ciclo-infraestructura, de acuerdo con sus niveles de estrés 3 y 4, tampoco resultan ser una opción conveniente para todos los tipos de usuarios de la bicicleta, a menos de tener un carril segregado de flujo exclusivo de bicicletas.

Figura 16

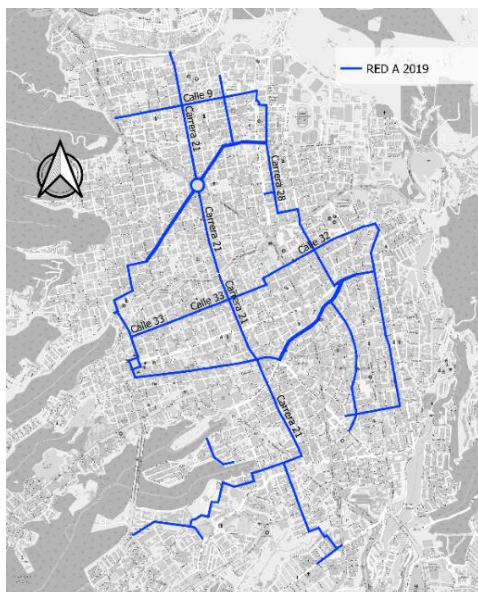
Mapa representativo de las vías restringidas para ciclo vías según POT



En la Figura 17 se presenta la ciclo-infraestructura actual construida en la ciudad de Bucaramanga y es posible observar que corredores como el de la Carrera 21 indican un LTS 4, es decir, que se recomienda su uso solo para ciclistas experimentados.

Figura 17

Mapa de la red de ciclo vías desarrolladas en el 2019



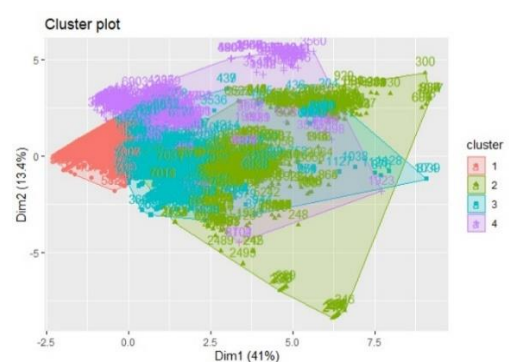
4.2.2 Escenario 2

El segundo escenario se planteó con el fin de observar el cambio en el LTS en los corredores por donde pasa la actual cicloruta y la pertinencia de sus proyecciones a 2025 y 2030 para la ciudad de Bucaramanga.

De este modo, las variables influyentes para correr el método en el segundo escenario fueron el ancho de calzada, número de carriles, velocidad de operación, presencia de tráfico pesado, presencia de infraestructura ciclista y flujo de vehículos livianos, buses y camiones. La agrupación de los segmentos en los cuatro clústeres se muestra en la Figura 18 y se puede observar que en el clúster 4 aparentemente aumentó su desviación estándar.

Figura 18

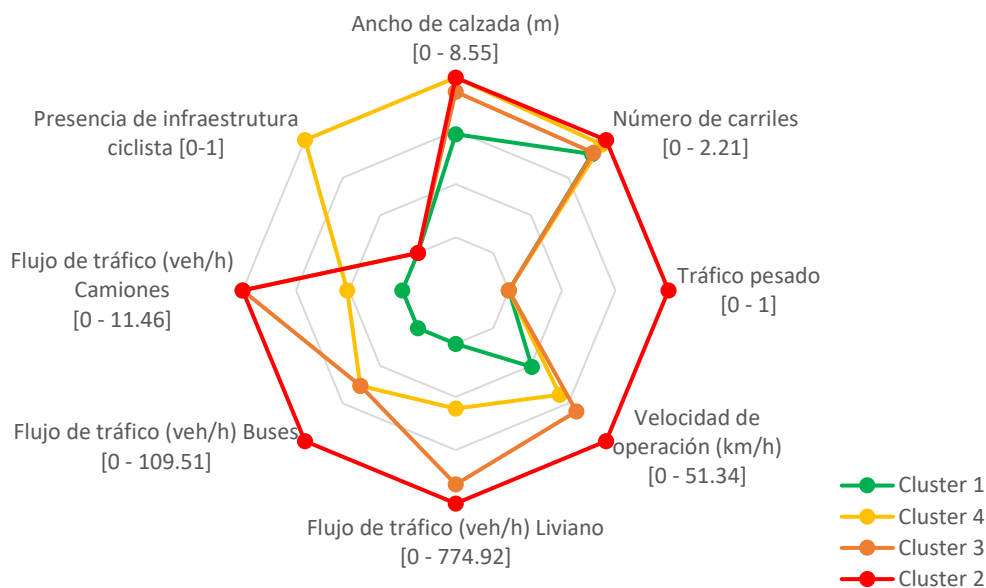
Distribución de los elementos por clúster escenario 2



El procedimiento de asignación de LTS fue idéntico al aplicado en el escenario 1. En el apéndice D se presentan las estadísticas resumidas para los tramos viales de cada clúster y en la Figura 19 se ilustra esta información mediante un gráfico de radar, donde cada vértice del gráfico representa una de las cinco variables y junto al nombre de la variable, se muestra el rango para el valor promedio.

Figura 19

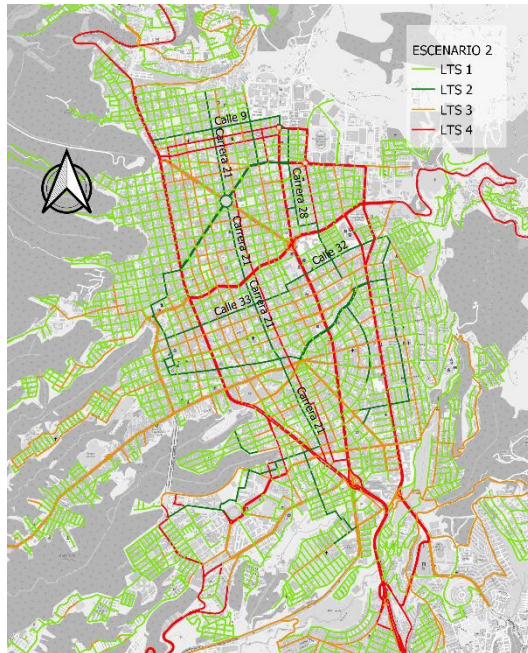
Gráfico de radar con los valores medios de cada variable por clúster escenario 2



El análisis estadístico de los datos pertenecientes a cada clúster permitió asignar las etiquetas de LTS de la siguiente manera: El clúster 1 clasificó como LTS 1, es decir, corredores amables con el tránsito de bici-usuarios, el clúster 2 se identificó con LTS 4, lo que se traduce como los corredores que mayor estrés generan al momento de transitar en bicicleta, el clúster 3 con LTS 3 y el clúster 4 con LTS 2. Esto se ilustra en la Figura 20, donde además es posible observar que corredores como la Carrera 21, que indicaban LTS 4 en el análisis realizado para el primer escenario, ahora, cuando se le asignó la presencia de ciclo-infraestructura, inmediatamente disminuyó su LTS a 2, de esta forma mejoró sus condiciones operacionales e incentiva a otros usuarios a realizar su cambio modal.

Figura 20

Clasificación LTS de vías para escenario 2



Posteriormente, se relacionaron los resultados de LTS con las restricciones dadas por el POT y fue posible apreciar que las vías restringidas por el POT son precisamente las que presentan mayores índices de estrés para usuarios de bicicleta (LTS 4) siendo aptos para usuarios experimentados, excluyendo y desincentivando de esta forma el uso y atracción de usuarios.

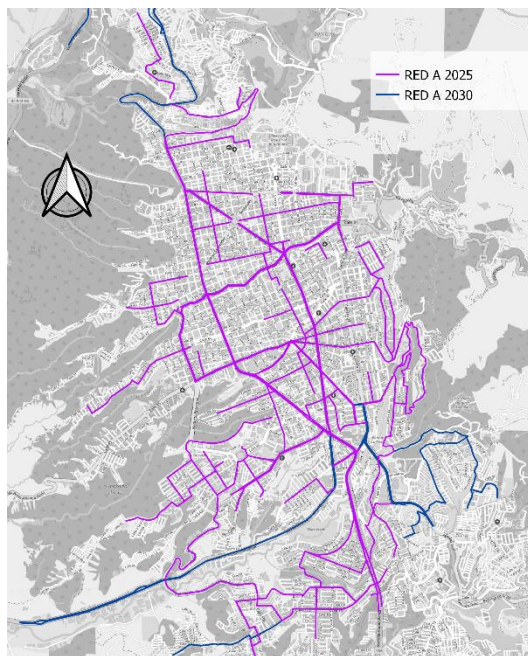
Finalmente, se evalúa la pertinencia de las proyecciones en ciclo-infraestructura para la ciudad de Bucaramanga en los años 2025 y 2030 según el nivel de estrés que representan con las condiciones actuales de movilidad e infraestructura, aclarando que este no es el único factor que determina si es o no adecuada una red de infraestructura ciclista por un corredor.

En la Figura 21 es posible identificar que las proyecciones están planteadas por vías que además de presentar un nivel de estrés elevado, están violando la regulación vigente, ya que esta

no permite intervenir corredores como la Avenida Quebradaseca, la carrera 15 o la carrera 27. Sin embargo, su vigencia va hasta el 2027 y se espera que su actualización vaya acorde a promover modos más sustentables, descongestionar la ciudad, reducir en primera medida la cantidad de gases de efecto invernadero y el número de siniestros fatales y no fatales.

Figura 21

Red de ciclo vías proyectadas para el año 2025 y 2030

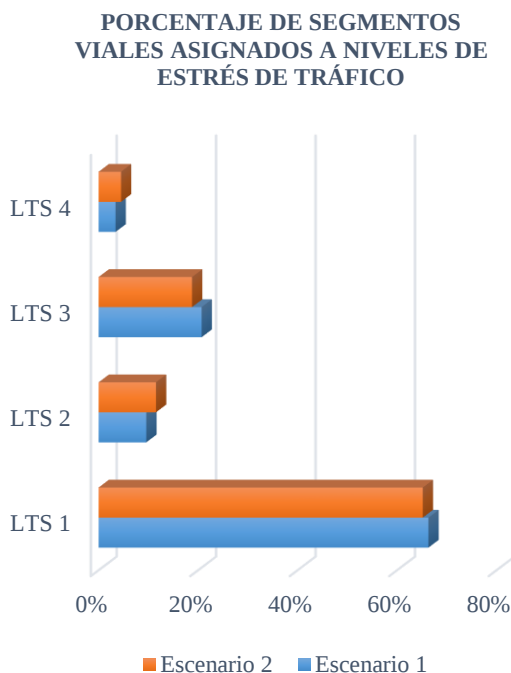


La Figura 22 representa la proporción de segmentos viales que fueron agrupados en cada clúster de LTS y es posible observar que la mayoría de los tramos viales se encuentran en la categoría de LTS 1, la cual representa la condición más favorable para todo tipo de usuarios de bicicleta, es decir, en la que perciben menores niveles. En la Figura 15 y Figura 20 se observa que estos tramos corresponden en su mayor parte a vías clasificadas como red local de nivel 1 y 2 según el POT vigente. Además, se puede observar para el escenario 2 un aumento en la cantidad

de segmentos pertenecientes al LTS 2 y a su vez, una disminución en los elementos de la categoría LTS 3, esto se debe a que la inclusión de la ciclo-infraestructura disminuyó el nivel de estrés del tráfico en estos segmentos.

Figura 22

Porcentaje de segmentos viales asignados a niveles de estrés de tráfico



5. Conclusiones y recomendaciones

En este artículo de investigación se presentó una metodología de clasificación de LTS asociada a datos de una malla vial. La metodología comprendió cuatro pasos: seleccionar las variables que describen los tramos de la malla vial; calcular un número de clústeres para los tramos de vía; programar un método de clasificación y utilizarlo para organizar cada tramo de la malla vial en uno de los clústeres; y finalmente, asignar una categoría LTS a cada clúster en función de los atributos y asociarla a un tipo de usuarios de la bicicleta de acuerdo con su nivel de experiencia. La metodología fue aplicada en dos escenarios, uno en el que no se incluyó la ciclo-infraestructura

actual y otro en el cual, si fue incluida, haciendo hincapié que no se consideró la posible redistribución del tráfico por la presencia de ciclo ruta por no ser objeto de este estudio.

Los tramos de vía fueron agrupados en 4 clústeres y posteriormente etiquetados con LTS 1, 2, 3 o 4, de acuerdo a las características representativas de cada uno y de forma complementaria se asociaron de acuerdo con el nivel de experiencia de los diferentes tipos de usuarios de la bicicleta que se plantearon en la Tabla 3.

Una consideración importante que se evidenció al momento de tratar los datos para asignar las etiquetas de LTS es que variables como el flujo de vehículos livianos, buses y camiones presentaron desviaciones estándar elevadas en los dos escenarios planteados (Ver apéndice C y apéndice D) y esto es porque como se mencionó en la Sección 4.1, estos valores son resultado de un modelo de asignación dinámica utilizando herramientas de micro simulación en el desarrollo de una tesis de maestría, ya que la ciudad no cuenta con este tipo de información disponible y las aproximaciones que este modelo de asignación dinámico presenta influyen en la precisión de los resultados. Sin embargo, es importante aclarar que esto no es una falencia del método, sino de la falta de información disponible de existe en la ciudad de Bucaramanga en este contexto. Además, cabe recalcar que con el proceso de estandarización se garantizaba que todas las variables influyeran de manera equitativa en la generación de los clústeres y evitar sesgos por las diferencias de escala, lo cual también genera valores elevados de desviación estándar en los datos sin estandarizar de las variables relacionadas con el flujo.

De los resultados obtenidos en el escenario 2 (Sección 4.2.2) se evidenció que en la Carrera 21 su nivel de estrés disminuyó con la implementación de la ciclovía, y esto indica que lo mismo puede realizarse en otros corredores como el de la Carrera 27, que, aunque ofrece altos niveles de

estrés de tráfico, según un mapa de calor realizado en el plan de la bicicleta como medio de transporte, ilustrado en la Figura 23, esta vía se caracteriza por un alto uso de usuarios en bicicleta.

Figura 23

Mapa de calor del uso de la bicicleta en Bucaramanga



Nota: el mapa representa la intensidad de uso de las vías por los ciclistas, *La bicicleta como medio de transporte: Estrategia 2019-2030 para Bucaramanga y su Área Metropolitana*. Bucaramanga: Espacio. Por Pardo, C. F., Moscoso, M., Olivares, C., Van Laake, T., Gomez, D., & Herrera, I. (2018).

También se evidencia que, aunque la mayoría de las vías estén clasificadas como LTS 1, no son los corredores más directos ni los más usados por los ciclistas en la realización de sus viajes; y esto es porque, aunque la metodología representa un factor importante y que hasta ahora no se había tenido en cuenta en la ciudad de Bucaramanga, como es el nivel de estrés que experimenta un ciclista, no es el único factor que se debe tener en cuenta para el trazado de la cicloinfraestructura.

El objetivo de la aplicación de la metodología fue suministrar a los planificadores una clasificación basada en LTS ajustable y sensible al contexto, que podría representar una herramienta útil para la evaluación de una red ciclista por contemplar variables físicas y funcionales de la malla vial. Además, podría ser útil en el desarrollo de nuevas estrategias e intervenciones para generar una red interconectada de bajo estrés en Bucaramanga y un posible

entorno construido más seguro para los ciclistas. Sin embargo, es importante destacar que adquirir la información actualizada no es fácil y eso aumenta el nivel de complejidad de la investigación.

Cabe resaltar que el uso de herramientas de programación, como R, en estudios de transporte permite análisis más robustos y con manejo de grandes cantidades de información, por lo cual en la Escuela de Ingeniería Civil debería usarse con más frecuencia y brindar a los estudiantes opciones de capacitarse en dichas herramientas y análisis.

Referencias Bibliográficas

- Abad, L., & Van der meer, L. (2018). Quantifying Bicycle Network Connectivity in Lisbon Using Open Data . *MDPI*, 9(11).
- Báez, C., Porras, H., & Martinez Estupiñan, Y. (2021). *La información sobre el estado de tráfico y su rol en la redistribución de flujos. Caso de estudio: Área Metropolitana de Bucaramanga (Tesis de Maestría en Ingeniería Civil en proceso de finalización) Universidad Industrial de Santander.*
- Bearn, C., Mingus, C., & Watkins, K. (2018). An adaption of the level of traffic stress based on evidence from the literature and widely available data. *Research in Transportation Business & Management*, 29, 50-62.
- Berger, M., & Dörrzapf, L. (2018). Sensing comfort in bicycling in addition to travel data. *Transportation Research Procedia*, 32, 524-534.
- Brown, D. (2008). Introduction to Data Mining for Medical Informatics. *Clinics in Laboratory Medicine*, 28, 9-35.
- Caviedes, A., & Figliozzi, M. (2018). Modeling the impact of traffic conditions and bicycle facilities. *ELSEVIER*, 58, 488-499.
- Chen, C., Anderson, J., Wang, H., Wang, Y., Vogt, R., & Hernandez , S. (2017). How bicycle level of traffic stress correlate with reported cyclist accidents injury severities: A geospatial and mixed logit analysis. *Accident Analysis y Prevention*, 108, 234-244.
- Cornuéjols, A., Wemmert, C., Gańczarski, P., & Bennani, Y. (2018). Collaborative clustering: Why, when, what and how. *Information fusion*, 39, 81-95.
- Council, B. C. (2017). *City of Berkeley bicycle plan*. Berkeley.

- Epperson, B. (1994). Evaluating suitability of roadways for bicycle use: toward a cycling level-of-service standard. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*, 9-16.
- Franklin, J. (2005). The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction. *The Mathematical Intelligencer*, 27, 83-85.
- Furth, P., Mekuria, M., & Nixon, H. (2016). Network Connectivity for Low-Stress Bicycling. *Transportation research board*, 2587(1), 41-49.
- Hae-Sang, P., & Jun, C.-H. (2009). A simple and fast algorithm for K-medoids clustering. *Expert Systems with Applications*, 36(2), 3336-3341.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2008). *The Elements of Statistical*. Stanford, California.
- Hidalgo, D., & Huizenga, C. (2013). Implementation of sustainable urban transport in Latin America. *Research in Transportation Economics*, 40(1), 66-77.
- Huertas, J., Palacio, A., Botero, M., Carvajal, G., Van Laake, T., Higuera Mendieta, D., . . . Medaglia, A. (2020). Level of traffic stress-based classification: A clustering approach for Bogotá, Colombia. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85, 2-17.
- Imani, A. F., Miller, E., & Saxe, S. (2019). Cycle accessibility and level of traffic stress: A case study of Toronto. *Journal of Transport Geography*, 80, 2-10.
- Kaufman, L., & Rousseeuw, P. (1990). *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Landis, B. (1996). Bicycle system performance measures: the interaction hazard and latent demand score models. *The national academies of sciences engineering medicine*, 66, 1-5.

- Lowry, M., Furth, P., & Hadden-Loh, T. (2016). Prioritizing new bicycle facilities to improve low-stress network connectivity. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 124-140.
- Miller, H., & Han, J. (2001). Métodos de agrupamiento espacial en minería de datos. En *Minería de datos geográficos y descubrimiento de conocimientos* (págs. 216-246).
- Pardo, C. F., Moscoso, M., Olivares, C., Van Laake, T., Gomez, D., & Herrera, I. (2018). *La bicicleta como medio de transporte: Estrategia 2019-2030 para Bucaramanga y su Área Metropolitana*. Bucaramanga: Despacio.
- Pardo, C., & Sanz, A. (2016). *Guía de ciclo-infraestructura*. Bogotá D.C.: Ministerio de Transporte de Colombia. Obtenido de https://www.mintransporte.gov.co/Documentos/documentos_del_ministerio/Publicaciones
- Plan maestro de movilidad Bucaramanga 2010-2030*. (s.f.).
- Rios, R. A., & Taddia, A. (2014). *Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: guía para impulsar el uso de la bicicleta*. América latina y el caribe: Despacio.
- Rodriguez Valencia, A., Vallejo Borda, J. A., Barrero, G. A., & Ortiz Ramirez, H. A. (2021). Towards an enriched framework of service evaluation. *Transportation*.
- Rousseeuw, P. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53-65.
- Schubert, E., & Rousseeuw, P. (2020). *Fast and Eager k-Medoids Clustering: O(k) Runtime Improvement of the PAM, CLARA, and CLARANS Algorithms*. Information Systems.
- Sorton, A., & Walsh, T. (1994). Bicycle stress level as a tool to evaluate urban and suburban bicycle compatibility. *Transportation Research Record*, 17-24.

- Tucker, B., & Manaugh, K. (2018). Bicycle equity in Brazil: Access to safe cycling routes across neighborhoods in Rio de Janeiro and Curitiba. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12(1), 29-38.
- Vallejo Borda, J., Rosas Satizabal, D., & Rodriguez Valencia , A. (2020). Do attitudes and perceptions help to explain cycling infrastructure quality of service? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87.
- Zuniga, N., Ross, H., & Machemehl, R. (2018). Multimodal Level of Service Methodologies: Evaluation of the Multimodal Performance of Arterial Corridors. *Transportation research board*, 2672(15), 142-154.
- Zuo, T., Wei, H., & Chen, N. (2021). Incorporating low-stress bicycling connectivity into expanded transit service coverage. *Transportation Research Record*, 4, 79-89.

Apéndices

Apéndice A

Documentos hallados mediante la ecuación de búsqueda en SCOPUS

ITEM	TÍTULO DEL DOCUMENTO	AUTORES	AÑO	NÚMERO DE CITACIONES
1	Incorporating low-stress bicycling connectivity into expanded transit service coverage	Zuo, T., Wei, H., Chen, N.	2021	0
2	Towards an enriched framework of service evaluation for pedestrian and bicyclist infrastructure: acknowledging the power of users' perceptions	Rodriguez-Valencia, A., Vallejo-Borda, J.A., Barrero, G.A., Ortiz-Ramirez, H.A.	2021	0
3	Do attitudes and perceptions help to explain cycling infrastructure quality of service?	Vallejo-Borda, J.A., Rosas-Satizábal, D., Rodriguez-Valencia, A.	2020	2
4	Level of traffic stress-based classification: A clustering approach for Bogotá, Colombia	Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L.	2020	6
5	A cycling-focused accessibility tool to support regional bike network connectivity	Gehrke, S.R., Akhavan, A., Furth, P.G., Wang, Q., Reardon, T.G.	2020	5
6	Commuting patterns and bicycle level of traffic stress (LTS): Insights from spatially aggregated data in Franklin County, Ohio	Wang, K., Akar, G., Lee, K., Sanders, M.	2020	1
7	Bicyclist and Pedestrian Safety Improvements on Water Street Corridor	Schenkel, M., Nguyen, T., Kutay, C., (...), Kim, N., Dobson, R.	2020	0
8	Validation of Bicycle Level of Traffic Stress and Perceived Safety for Children	Ferenchak, N.N., Marshall, W.E.	2020	0
9	Cycle accessibility and level of traffic stress: A case study of Toronto	Faghih Imani, A., Miller, E.J., Saxe, S.	2019	2
10	Low-stress bicycling connectivity: Assessment of the network build-out in Edmonton, Canada	Cabral, L., Kim, A.M., Shirgaokar, M.	2019	3

11	Bicycle level of service for route choice—A GIS evaluation of four existing indicators with empirical data	Pritchard, R., Frøyen, Y., Snizek, B.	2019	13
12	Implementing Low-Stress Bicycle Routing in National Accessibility Evaluation	Murphy, B., Owen, A.	2019	5
13	Evaluating OpenStreetMap's Performance Potential for Level of Traffic Stress Analysis	Wasserman, D., Rixey, A., Zhou, X., Levitt, D., Benjamin, M.	2019	1
14	Prioritizing low-stress and equitable bicycle networks using neighborhood-based accessibility measures	Kent, M., Karner, A.	2019	6
15	The Keys to Connectivity: The District of Columbia's Innovative Approach to Unlocking Low-Stress Bicycle Networks	Semler, C., Sanders, M., Buck, D., (...), Cesme, B., Wang, S.	2018	2
16	An adaption of the level of traffic stress based on evidence from the literature and widely available data	Bearn, C., Mingus, C., Watkins, K.	2018	0
17	Lowering Bicycle Stress One Link at a Time: Where Should We Invest in Infrastructure?	Moran, S.K., Tsay, W., Lawrence, S., Krykewycz, G.R.	2018	5
18	Quantifying bicycle network connectivity in Lisbon using open data	Abad, L., van der Meer, L.	2018	1
19	Modeling the impact of traffic conditions and bicycle facilities on cyclists' on-road stress levels	Caviedes, A., Figliozi, M.	2018	23
20	A behavioral modeling approach to bicycle level of service	Griswold, J.B., Yu, M., Filingeri, V., Grembek, O., Walker, J.L.	2018	15
21	Multimodal level of service methodologies: Evaluation of the multimodal performance of arterial corridors	Zuniga-Garcia, N., Ross, H.W., Machemehl, R.B.	2018	3
22	Bicycle equity in Brazil: Access to safe cycling routes across neighborhoods in Rio de Janeiro and Curitiba	Tucker, B., Manaugh, K.	2018	17

23	Measuring low-stress connectivity in terms of bike-accessible jobs and potential bike-to-work trips: A case study evaluating alternative bike route alignments in Northern Delaware	Furth, P.G., Putta, T.V.V.K., Moser, P.	2018	7
24	How bicycle level of traffic stress correlate with reported cyclist accidents injury severities: A geospatial and mixed logit analysis	Chen, C., Anderson, J.C., Wang, H., (...), Vogt, R., Hernandez, S.	2017	27
25	Impacts of Level of Traffic Stress on Bikeshare Ridership in the Case of Capital Bikeshare in Montgomery County, Maryland	Prabhakar, R., Rixey, R.A.	2017	5
26	Low-Stress Bicycle Network Mapping: The District of Columbia's Innovative Approach to Applying Level of Traffic Stress	Semler, C., Sanders, M., Buck, D., (...), Pochowski, A., Dock, S.	2017	5
27	Does bicycle network level of traffic stress (LTS) explain bicycle travel behavior? Mixed results from an Oregon case study	Wang, H., Palm, M., Chen, C., Vogt, R., Wang, Y.	2016	28
28	Traffic stress and bicycling to elementary and junior high school: Evidence from Davis, California	Fitch, D.T., Thigpen, C.G., Handy, S.L.	2016	11

Apéndice B

Documentos hallados en las referencias

TÍTULO DEL DOCUMENTO	AUTORES	AÑO	CITADO POR
Bicycle stress level as a tool to evaluate urban and suburban bicycle compatibility	A. Sorton y T. Walsh	1994	Zuo, T., Wei, H., Chen, N. (2021) y Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L. (2020)
Prioritizing new bicycle facilities to improve low-stress network connectivity	M. Lowry, P. Furth y T. Hadden-Loh	2016	Zuo, T., Wei, H., Chen, N. (2021) y Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L. (2020)

Evaluating suitability of roadways for bicycle use: toward a cycling level-of-service standard	B. Epperson	1994	Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L. (2020)
Bicycle system performance measures: the interaction hazard and latent demand score models	B. Landis	1996	Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L. (2020)
Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: guía para impulsar el uso de la bicicleta, América latina y el caribe	R. A. Rios y A. Taddia	2014	Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L. (2020)
Sensing comfort in bicycling in addition to travel data	M. Berger y L. Dörrzapf	2018	Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L. (2020)
City of Berkeley bicycle plan, Berkeley	B. C. Council	2017	Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L. (2020)
Network Connectivity for Low-Stress Bicycling	P. Furth, M. Mekuria y H. Nixon	2016	Zuo, T., Wei, H., Chen, N. (2021) y Huertas, J.A., Palacio, A., Botero, M., (...), Sarmiento, O.L., Medaglia, A.L. (2020)

Apéndice C

Estadística de resultados para el escenario 1

Escenario 1		CLÚSTERES							
		1		2		3		4	
Número de segmentos		4667		674		1458		239	
Kilómetros por clúster		329.68		59.87		123.58		24.50	
VARIABLES		MEDIA	DESV. EST.	MEDIA	DESV. EST.	MEDIA	DESV. EST.	MEDIA	DESV. EST.
Ancho de calzada (m)		6.28	1.36	7.94	2.28	7.96	2.21	10.86	2.15
Número de carriles		2.00	0.00	2.00	0.00	2.00	0.00	3.00	0.00
Tráfico pesado		0.00	0.03	1.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0.35
Velocidad de operación (km/h)		26.08	2.76	49.36	9.04	40.41	9.73	54.48	8.07
Flujo de tráfico (veh/h)	Liviano	73.68	90.85	636.91	487.05	677.88	443.54	1118.79	723.10
	Buses	5.82	22.86	130.09	183.00	71.51	95.38	38.45	34.30
	Camiones	0.03	0.47	9.89	13.53	10.29	16.15	17.69	12.40

Apéndice D

Estadística de resultados para el escenario 2

Escenario 2	CLÚSTERES							
	1	2	3	4				
Número de segmentos	4587	812	1322	317				
Kilómetros por clúster	323.45	74.68	114.38	25.11				
VARIABLES	MEDIA	DESV. EST.	MEDIA	DESV. EST.	MEDIA	DESV. EST.	MEDIA	DESV. EST.
Ancho de calzada (m)	6.27	1.36	8.55	2.598	7.98	2.27	8.26	2.03
Número de carriles	2.00	0.00	2.21	0.41	2.02	0.14	2.14	0.35
Tráfico pesado	0.00	0.03	1.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.41
Velocidad de operación (km/h)	26.05	2.72	51.34	8.82	41.23	10.12	35.52	7.83
Flujo de tráfico (veh/h)	Liviano	72.02	88.23	774.92	606.95	705.80	429.82	325.95
	Buses	5.62	22.55	109.51	168.85	69.30	85.73	69.37
	Camiones	0.03	0.47	11.46	13.33	11.15	16.99	5.83
Presencia de infraestructura ciclista	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00

Apéndice E

Código utilizado en el software Rstudio para el análisis clúster

```

ipak <- function(pkg){
  new.pkg <- pkg[!(pkg %in% installed.packages()[, "Package"])]
  if (length(new.pkg))
    install.packages(new.pkg, dependencies = TRUE)
  sapply(pkg, require, character.only = TRUE)
}

packages <- c("fpc","NbClust","cluster","factoextra","tidyr", "dplyr","rio")
ipak(packages)
setwd("C:/Users/User/Desktop/proyecto")
library(rio)
library(readxl)
library(dplyr)
library(tibble)

#importamos datos
dfexcel <- read_excel("C:/Users/User/Desktop/proyecto/Datos.xlsx")
#dfexcel <- read_excel("C:/Users/User/Desktop/proyecto/Datos2.xlsx")
df<- scale(dfexcel[, 2:9])
#df<-dfexcel %>% mutate_at(scale, .vars = vars(-ID))

```

```
head(dfexcel)

#Cálculo de los clústers
pam4<-pam(df,4)
print(pam4)

#Visualizaciones
#fviz_cluster(pam4, data = df, ellipse.type = "norm")
fviz_cluster(pam4,data=df)

#pegamos en nuestro data frame
df<- as.data.frame(df)
df
dfexcel$clus<-as.factor(pam4$clustering)
df

#exportamos archivo
export(dfexcel,"clustering.xlsx")
```