

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Análisis de decisión de ruta de ciclistas enfocado en seguridad vial y ciclo- infraestructura a partir de los registros GPS de una aplicación móvil

Laura Daniela Ramírez Leuro

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2021

Cyclist route decision analysis focused on road safety and cycle-infrastructure from the GPS records of a mobile application

Laura Daniela Ramírez Leuro

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Transporte

Director:

Lenin Alexander Bulla Cruz. M. Eng. M.Sc. Ph.D.

Codirectora:

Sonia Cecilia Mangones Matos. M. Eng. M.Sc. Ph.D.

Línea de Investigación:

Planeación de la Movilidad - Movilidad y Desarrollo Tecnológico

Grupo de Investigación:

Grupo de investigación en logística para el transporte sostenible y la seguridad -

TRANSLOGYT

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2021

Este estudio analiza ciclistas, no ciclo-usuarios ni bici-usuarios, porque la segunda y tercera opción priorizan al vehículo y no a la persona, esencial diferencia para el primer término.

¿Acaso alguna vez has leído carro-usuario o moto-usuario?

Este es un referente desde el lenguaje y la academia para visibilizar a la persona sobre el vehículo, en un constante debate donde aún es difícil como ciudadanos priorizar a la humanidad en la teoría y en la práctica.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Laura Daniela Ramírez Leuro

Fecha 22/01/2022

Agradecimientos

Gratitud y admiración al universo, a mi familia, a la comunidad de la Universidad Nacional de Colombia y de la Universidad de los Andes que hicieron posible este trabajo de grado, a la empresa internacional de la aplicación móvil Biko y a la Secretaría Distrital de Movilidad por su apoyo para conocer sobre las rutas de los ciclistas en la ciudad de Bogotá, específicamente:

A *Paula Leuro*, mi hermana, por ser un referente de presentar trabajos de grado con enfoque de aplicación y estrategias creativas para su difusión, además de su apoyo incondicional en este proceso.

A *Lenin Bulla*, porque además de ser director de trabajo de grado fue un apoyo invaluable en todas las facetas de este proceso académico, profesional y personal.

A *Sonia Mangones*, por su tutoría desde la codirección de esta investigación.

A *Álvaro Rodríguez-Valencia*, porque durante el año de intercambio en la Universidad de los Andes además de enseñarme sobre modos no motorizados, se convirtió en mi mentor para motivarme aún más por analizar el ciclismo desde un enfoque de investigación multidisciplinar.

A *Enrique Cuellar*, director de la empresa Biko por confiar en esta investigación y compartir sin ánimo de lucro la información de rutas en el marco de *habeas data*.

Al equipo de la *Secretaría Distrital de Movilidad* durante 2019, liderado por *Juan Pablo Bocarejo*, al equipo de la Subdirección de la Bicicleta en su momento liderado por *Deyanira Ávila* y a *Juan Manuel Prado*, por la disposición de tener datos abiertos y su apoyo para analizar las dinámicas del uso de la bicicleta en Bogotá.

A *Alejandra García, Julián Otero y Julián Sandoval* de la Universidad Nacional de Colombia por sus tutorías en corrección de estilo, RStudio y Stata respectivamente.

A *Joaquín Franco, Luis Rubio, Daniel Sandoval y Andrés Dávila* de la Universidad de los Andes por su enseñanza en Sistemas de Información Geográfica y manejo de Stata respectivamente.

A *Ingrid Portilla y Nicolás Correal* por ser mis maestros profesional y personalmente durante este proceso.

Resumen

Este estudio tiene como objetivo principal analizar la decisión de ruta de los ciclistas al considerar atributos de seguridad vial y ciclo-infraestructura a partir de registros de geo posicionamiento de una aplicación móvil en Bogotá. Para esto, se construyó una base de datos geográfica con 3.016 rutas de ciclistas registrados en la aplicación móvil Biko durante febrero de 2018. Esta base de datos fue articulada con registros de siniestralidad y ciclo-infraestructura de entidades públicas, para luego, con estadística descriptiva realizar análisis univariado (RStudio) y Análisis de Correspondencias Múltiples –MCA– (Stata) con enfoque estadístico multivariado y el componente geográfico (QGIS y ArcGIS). Finalmente, como resultado se obtuvo: [i] un procedimiento para caracterizar variables cuantitativas por km de ruta recorrida; [ii] categorización de las variables continuas para establecer relaciones multivariadas mediante MCA –condición para emplear este método en reemplazo del uso de encuestas– (Encuesta de movilidad 2019 sección ciclistas en Bogotá); [iii] patrones de desplazamiento de ciclistas con identificación de principales zonas Origen – Destino (UTAM en Bogotá); y [iv] posibles condiciones iniciales de enfoque de políticas públicas, en Bogotá, respecto a la relación entre variables como: hurtos, siniestros, semáforos, velocidad y ciclo-infraestructura, entre otras. Lo anterior, con una comparación continua entre estudios de caso en Colombia, Latinoamérica, Europa y Estados Unidos con el fin de ser replicable para cualquier ciudad.

Palabras clave: Decisión de Ruta, Ciclistas, Seguridad vial, Ciclo-infraestructura, Bicicleta, GPS, aplicaciones móviles.

Abstract

The main objective of this study is to analyze the decision of the cyclists' route by considering attributes of road safety and cycle-infrastructure from GPS records of a mobile application in Bogotá. For this, a database was built from 3016 georeferenced routes of cyclists registered in the Biko mobile application during February 2018. This database was articulated with accident and cycle-infrastructure records of public entities, and later, with a descriptive statistical univariate analysis (RStudio) and Multiple Correspondence Analysis –MCA– (Stata) with multivariate statistical approach and geographic component (QGIS and ArcGIS). Finally, as results were obtained: [i] a procedure for characterizing quantitative variables per km of route traveled; [ii] Categorization of continuous variables for establishing multivariate relationships through MCA – prerequisite for using this method in replacing the use of surveys– (Mobility survey 2019 cyclists' section in Bogotá); [iii] cyclists' commuting patterns with identification of main Origin - Destination zones (UTAM in Bogotá), and [iv] possible initial conditions for the public policies approach, in Bogotá, regarding the relationship between variables such as: thefts, accidents, traffic lights, speed and cycle-infrastructure. The foregoing, with a continuous comparison between case studies in: Colombia, Latin America, Europe, and the United States, in order to be replicable for any city.

Keywords: Route Choice, Cyclists, Road Safety, Cycle-infrastructure, Bicycle, GPS, mobile applications.

Contenido

1	Introducción	19
1.1	Antecedentes y motivación	19
1.2	Definición del problema.....	29
1.3	Pregunta de investigación e hipótesis.....	30
1.4	Objetivos de investigación	31
1.4.1	Objetivo general	31
1.4.2	Objetivos específicos	31
1.5	Metodología	31
1.6	Alcance.....	32
1.7	Contribución al estado del conocimiento y limitaciones	33
1.8	Contenido de esta investigación.....	33
2	Marco teórico y revisión de literatura	35
2.1	Análisis geoespacial de rutas de ciclistas	36
2.2	Caracterización de ciclistas	40
2.3	Seguridad vial para ciclistas	44
2.4	Ciclo-infraestructura.....	48
2.5	Estudio del uso de la bicicleta mediante análisis estadístico multivariado	52
2.6	Análisis de clúster para el uso de la bicicleta.....	57
2.7	Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA)	59
3	Análisis estadístico univariado de los registros GPS de ruta de ciclistas y definición de variables	65
3.1	Articulación y depuración de bases de datos espaciales	66
3.2	Caracterización de ruta.....	71
3.2.1	Día de inicio de ruta (día)	72
3.2.2	Duración de ruta (h).....	73
3.2.3	Velocidad promedio de ruta (km/h).....	73
3.2.4	Longitud de ruta (km).....	74
3.2.5	Longitud recta de ruta (km)	75
3.2.6	Sinuosidad (adimensional)	75

3.2.7	Origen y Destino con desagregación por UTAM	76
3.3	Seguridad vial y seguridad ciudadana	79
3.3.1	Siniestros por km de ruta (siniestros/km)	80
3.3.2	Fallecidos por km de ruta (fallecidos/km)	82
3.3.3	Hurtos por km de ruta (hurtos/km)	83
3.4	Infraestructura	84
3.4.1	Semáforos por km de ruta (semáforos/km)	86
3.4.2	Ciclo-infraestructura por km de ruta (adimensional)	87
3.5	Discusión de resultados frente a la Encuesta de Movilidad 2019	87
4	Análisis de clúster para la categorización de variables	95
4.1	Caracterización de ruta	96
4.1.1	Día de inicio de ruta	97
4.1.2	Tipo de ciclista según día de ruta	97
4.1.3	Hora de inicio de ruta	98
4.1.4	Duración de ruta	99
4.1.5	Velocidad promedio de ruta	100
4.1.6	Longitud de ruta	101
4.2	Seguridad vial y seguridad ciudadana	102
4.2.1	Siniestros por km de ruta	102
4.2.2	Fallecidos por km de ruta	103
4.2.3	Hurtos por km de ruta	104
4.3	Infraestructura	105
4.3.1	Semáforos por km de ruta	106
4.3.2	Ciclo-infraestructura por km de ruta	107
4.4	Categorización definitiva de las variables para MCA	108
5	Representación de la elección de ruta de ciclistas mediante Análisis de Correspondencias Múltiple	111
5.1	MCA para todas las variables y sus categorías	111
5.2	Caracterización de ruta	114
5.3	Seguridad vial y seguridad ciudadana	117
5.4	Infraestructura	120
5.5	Discusión de resultados frente a otros estudios	122
5.5.1	Seguridad vial y ciclo-infraestructura en intersecciones	122
5.5.2	Hurtos a ciclistas, hora de ruta y ciclo-infraestructura	124
6	Conclusiones y recomendaciones	127
6.1	Generales	127
6.2	Preguntas de investigación e hipótesis	131
6.3	Contribuciones al estado del conocimiento	132
7	Referencias	135

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Variación del uso de la bicicleta en Bogotá	19
Figura 1-2 Fallecidos en siniestros viales anuales en Bogotá 2017 -2019	20
Figura 1-3 Ciclo-infraestructura construida en Bogotá durante 1995-2021	21
Figura 1-4: Perspectivas de antecedentes sobre ciclistas y el uso de la bicicleta	22
Figura 1-5 Preguntas para la revisión de decisión de ruta de ciclistas.....	25
Figura 1-6 Metodología de tratamiento de datos de registros GPS	28
Figura 1-7 Esquema de opciones de ruta de ciclistas	30
Figura 1-8 Diagrama resumen de este estudio	34
Figura 2-1 Diagrama resumen del capítulo 2.....	35
Figura 2-2 Proceso de desagregación y tratamiento geoespacial de registros de ciclistas en Strava	37
Figura 2-3 Mapa de intensidad de uso de la bicicleta en Bucaramanga a partir de registros en Biko app	39
Figura 2-4 Metodología para el uso de registros GPS de rutas de ciclistas en seguridad vial	46
Figura 2-5 Coeficientes resultantes del modelo logit binario y variables para analizar siniestralidad de ciclistas en Bogotá	47
Figura 2-6 Tipo de ciclo-infraestructura según NACTO.....	50
Figura 2-7 Tipo de ciclo-infraestructura según Ministerio de Transporte de Colombia	51
Figura 2-8 Tipo de ciclo-infraestructura según Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá	51
Figura 2-9 Tipo de demarcación de ciclo-infraestructura según la Secretaría Distrital de Movilidad.....	52
Figura 2-10 Métodos de análisis multivariados según relación y tipo de variable	54
Figura 2-11 mapa de correspondencias.....	60
Figura 2-12 Transformación de tabla de contingencia para mapa de correspondencia	61
Figura 2-13 Método de MCA	61
Figura 2-14 MCA sobre colisiones de ciclistas, estudio de caso Lyon, Francia	62
Figura 2-15 MCA sobre factores de viaje de ciclistas, estudio de caso Roma, Italia	63

Figura 3-1 Diagrama resumen del capítulo 3	65
Figura 3-2 Origen y periodo para base de datos	66
Figura 3-3 Depuración de bases de datos geoespaciales	67
Figura 3-4 Depuración de registros tipo ruta	67
Figura 3-5 Enfoques para la creación de variables a partir de las bases de datos.....	68
Figura 3-6 Listado de variables construidas	69
Figura 3-7 Flujo del proceso de depuración iterativa para obtener la base de datos	70
Figura 3-8 Grupos de variables.....	71
Figura 3-9 Mapa de las rutas a caracterizar estadísticamente.....	71
Figura 3-10 Histograma de frecuencia para día de inicio de ruta.....	72
Figura 3-11 Histograma de frecuencia para duración de ruta.....	73
Figura 3-12 Histograma de frecuencia para velocidad promedio de ruta.....	74
Figura 3-13 Histograma de frecuencia para longitud de ruta	74
Figura 3-14 Histograma de frecuencia para longitud de ruta recta.....	75
Figura 3-15 Histograma de frecuencia para sinuosidad.....	76
Figura 3-16 Distribución general de registros por UTAM	77
Figura 3-17 Top 20 de UTAM con mayores registros de Origen de ruta.....	78
Figura 3-18 Top de UTAM con mayores registros de Destino de ruta	79
Figura 3-19 Diagrama de cajas y bigotes de variables de seguridad vial y ciudadana	80
Figura 3-20 Histograma de frecuencia para siniestros por km de ruta	81
Figura 3-21 Mapa de siniestralidad a ciclistas	81
Figura 3-22 Histograma de frecuencia para fallecidos por km de ruta.....	82
Figura 3-23 Mapa de fallecidos ciclistas	83
Figura 3-24 Histograma de frecuencia para hurtos por km de ruta	83
Figura 3-25 Mapa de hurtos a ciclistas	84
Figura 3-26 Diagrama de cajas y bigotes de variables de infraestructura	85
Figura 3-27 Mapa de ciclo-infraestructura y semaforización en Bogotá.....	86
Figura 3-28 Histograma de frecuencia para semáforos por km de ruta	86
Figura 3-29 Histograma de frecuencia para ciclo-infraestructura por km de ruta.....	87
Figura 3-30 Comparación día de ruta frente a la EM2019	89

Figura 3-31 Perfil horario de inicio de ruta de ciclistas frente a la EM2019	91
Figura 3-32 Perfil horario estudio de caso Canadá	92
Figura 3-33 Mapas de Origen desagregado por UTAM	93
Figura 3-34 Mapa de rutas Biko con Destino desagregado por UTAM	93
Figura 4-1 Diagrama resumen del capítulo 4	95
Figura 4-2 Agrupaciones de la categoría “día de la semana”	97
Figura 4-3 Variable tipo de ciclista según días en que viaja	98
Figura 4-4 Hora de amanecer durante febrero 2018 en Bogotá	98
Figura 4-5 Hora de anochecer durante febrero 2018 en Bogotá	99
Figura 4-6 Categorización mediante análisis de clúster para duración de ruta	99
Figura 4-7 Categorización mediante análisis de clúster para velocidad promedio de ruta	100
Figura 4-8 Referente internacional de análisis y clasificación de velocidad promedio	101
Figura 4-9 Categorización mediante análisis de clúster para longitud de ruta	102
Figura 4-10 Categorización mediante análisis de clúster para siniestros por km de ruta .	103
Figura 4-11 Categorización mediante análisis de clúster para fallecidos por km de ruta .	104
Figura 4-12 Categorización mediante análisis de clúster para hurtos por km de ruta	105
Figura 4-13 Categorización mediante análisis de clúster para semáforos por km de ruta	106
Figura 4-14 Categorización mediante análisis de clúster para ciclo-infraestructura por km de ruta	107
Figura 4-15 Resumen de categorización de 10 variables para MCA	109
Figura 4-16 Hora de inicio de ruta frente a la EM2019	110
Figura 5-1 Diagrama resumen del capítulo 5	111
Figura 5-2 MCA para las 10 variables	112
Figura 5-3 MCA para 11 variables	113
Figura 5-4 MCA para las variables de caracterización de ruta	115
Figura 5-5 MCA para las categorías de caracterización de ruta sin variable velocidad ...	116
Figura 5-6 MCA para variables de caracterización de ruta incluyendotipo de ciclista	117
Figura 5-7 MCA para las variables de seguridad vial y ciudadana	118
Figura 5-8 MCA para las variables de seguridad vial y ciudadana con velocidad	119
Figura 5-9 MCA para las variables de seguridad vial y ciudadana con variable tipo de ciclista	120

Figura 5-10 MCA para las variables de infraestructura con variable velocidad.....	121
Figura 5-11 MCA para las variables infraestructura con variable tipo de ciclista.....	122
Figura 5-12 MCA seguridad vial y ciclo-infraestructura en intersecciones	123
Figura 5-13 MCA hurtos, hora de ruta y ciclo-infraestructura	125

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1 Categorías de clasificación de origen de datos para analizar rutas de ciclistas ..	25
Tabla 1-2 Variables revisadas para caracterización de ciclistas y decisión de ruta.....	26
Tabla 1-3 Fases del método de la propuesta	32
Tabla 2-1 Fuentes de información de una red geoespacial para el análisis del uso de la bicicleta.....	37
Tabla 2-2 Variables y enfoques en estudios con análisis geoespacial de ciclistas	38
Tabla 2-3 Tipologías de caracterización de ciclistas	40
Tabla 2-4 Indicadores para analizar el ciclismo urbano en Latinoamérica, categorías 3 y 4	43
Tabla 2-5 Efectividad de intervenciones de seguridad vial para ciclistas	44
Tabla 2-6 Cinco principios de diseño de ciclo-infraestructura según CROW	48
Tabla 2-7 Valores propios y proporciones de inercia para los tipos de correcciones de MCA	60
Tabla 3-1 Resumen estadística descriptiva para variables de caracterización de ruta.....	72
Tabla 3-2 Características generales del <i>top</i> 5 de UTAM Origen.....	78
Tabla 3-3 Características generales de UTAM 99 – Destino	79
Tabla 3-4 Comparación de temporalidad y registros válidos frente a la EM2019	87
Tabla 3-5 Comparación de disponibilidad de variables frente a la EM2019.....	88
Tabla 3-6 Duración de ruta frente a la EM2019	92
Tabla 4-1 Librerías utilizadas en RStudio	96
Tabla 4-2 Resumen de categorización de 8 variables mediante análisis de clúster.....	108

Lista de Símbolos y abreviaturas

Abreviaturas y acrónimos

Abreviatura	Término
EM2019	Encuesta de Movilidad publicada en el año 2019 (Bogotá)
GPS	En inglés, <i>Global Positioning System</i>
GeoJSON	En inglés, <i>Geographic JavaScript Object Notation</i>
GNSS	En inglés, <i>Global Navigation Satellite System</i>
km	Kilómetros, en Sistema Internacional de Unidades
MCA	En inglés, <i>Multiple Correspondence Analysis</i>
OD	Origen - Destino
SDM	Secretaría Distrital de Movilidad (Bogotá)
SDS	Secretaría Distrital de Seguridad (Bogotá)
UTAM	Unidad Territorial de Análisis de Movilidad que está conformada por uno o varios barrios, tanto en suelo urbano como en suelo de expansión, que mantienen condiciones de uso del suelo y socioeconómicas homogéneas (Bogotá)

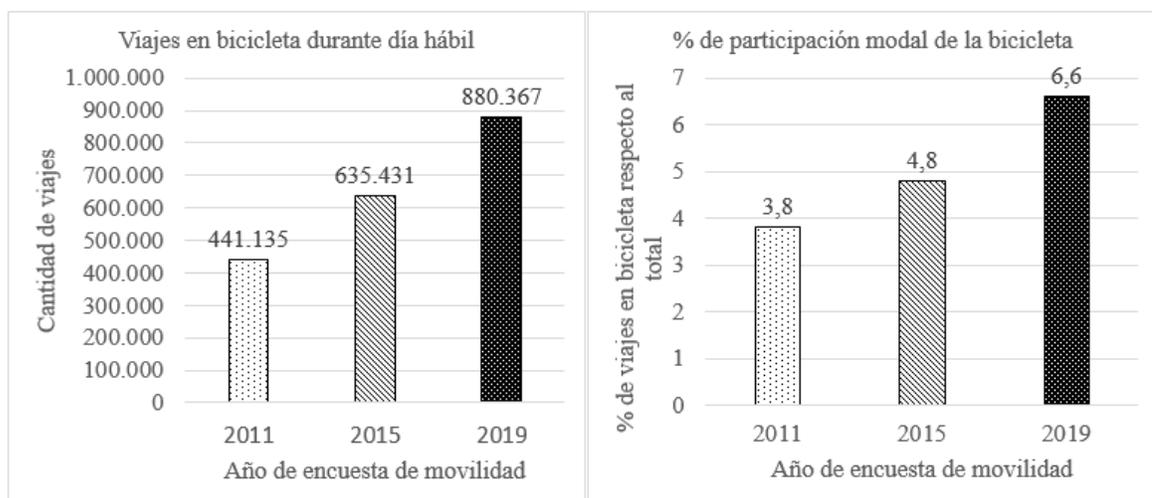
1 Introducción

Este capítulo presenta ocho secciones: antecedentes y motivación, definición del problema, preguntas de investigación e hipótesis, objetivo general y objetivos específicos, metodología, alcance, contribución al estado del conocimiento y limitaciones, y finalmente, la estructura de esta investigación.

1.1 Antecedentes y motivación

En la ciudad de Bogotá “la demanda de la bicicleta privada aumentará de forma importante durante los próximos diez años, con un crecimiento total de casi el 14% sobre los niveles actuales” (Steer Davies Gleave, 2013). Por otro lado, la Figura 1-1 evidencia que, según las encuestas de movilidad realizadas en 2011, 2015 y 2019, en Bogotá han aumentado los viajes en bicicleta y su respectiva participación modal (Secretaría Distrital de Movilidad, 2020).

Figura 1-1 Variación del uso de la bicicleta en Bogotá

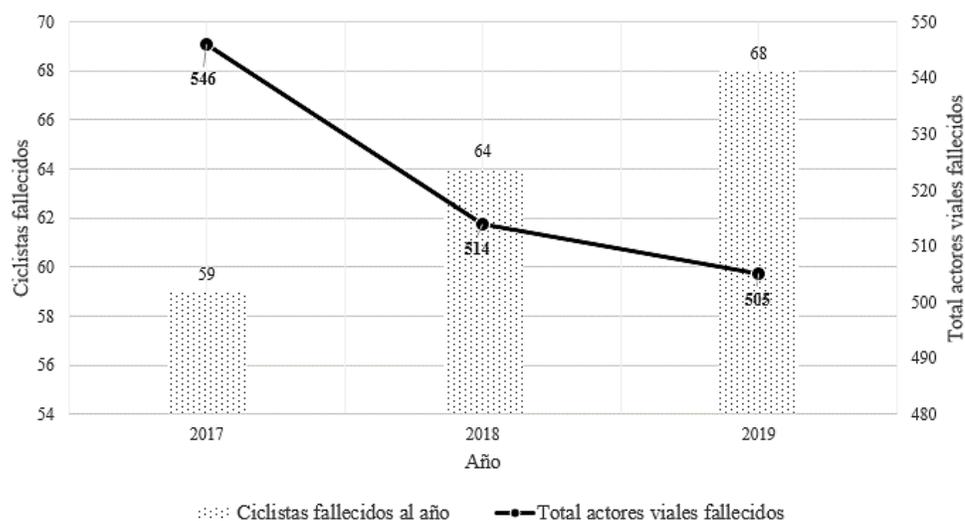


Fuente: Elaboración propia a partir de Secretaría Distrital de Movilidad (2011, 2015 y 2020)

De acuerdo con lo anterior y para dimensionar la magnitud de estos valores, los 880.367 viajes en bicicleta proyectados en 2019 en Bogotá corresponden a la cantidad aproximada de la población de ciudades como Marsella, Francia; Valencia, España; Ámsterdam, Países Bajos, o Copenhague, Dinamarca.

A partir de la revisión de literatura sobre seguridad vial en el uso de la bicicleta, diferentes estudios han identificado a nivel mundial que, usualmente, los siniestros en bicicleta no son reportados oficialmente (Vanparijs, Int Panis, Meeusen y de Geus, 2015). Además, se han determinado los posibles efectos en seguridad vial de acuerdo con el tipo de ciclo-
infraestructura construida (Digioia, Edison, Xu, Rodgers y Guensler, 2017). Estas razones soportan la necesidad de consultar sobre la variación de la siniestralidad en bicicleta en Bogotá. Uno de los mecanismos para hacer esta revisión es el anuario de siniestralidad de Bogotá (Secretaría Distrital de Movilidad, 2017, 2018 y 2019). La Figura 1-2 representa que los fallecidos disminuyeron desde 2017 hasta 2019 en todos los medios de transporte por siniestralidad vial, mientras que los ciclistas fallecidos aumentaron. Esto permite identificar que los ciclistas en Bogotá requieren un análisis más profundo con respecto a seguridad vial.

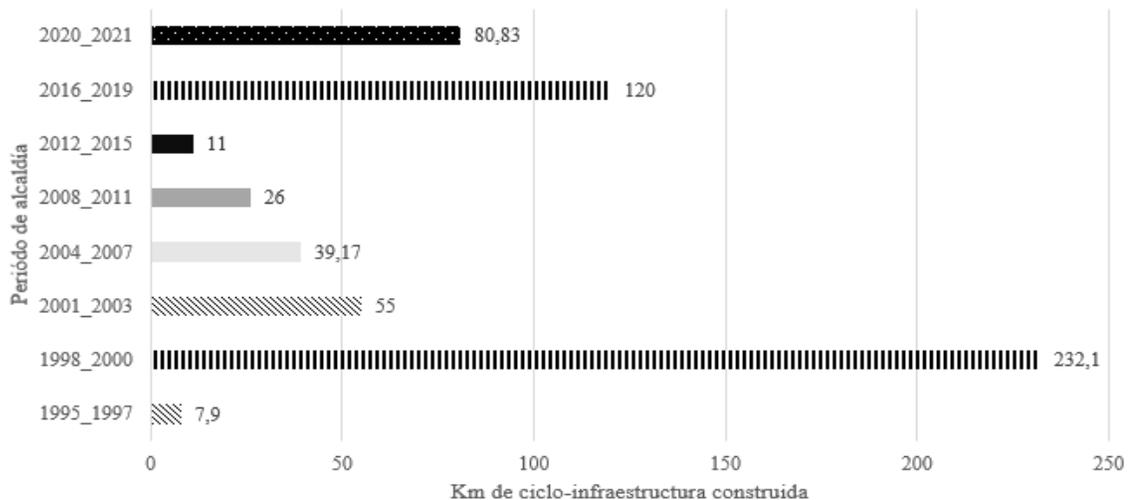
Figura 1-2 Fallecidos en siniestros viales anuales en Bogotá 2017 -2019



Fuente: Elaboración propia a partir de anuarios de siniestralidad de Bogotá (2017, 2018 y 2019)

Adicionalmente, el desarrollo de la ciclo-infraestructura es crucial para la promoción del uso de la bicicleta (Berma, López y Pardo, 2014); por tanto, este desarrollo es revisado en este estudio para comprender el contexto de las políticas públicas de la bicicleta en Bogotá. Esta investigación tuvo en cuenta que, en primer lugar, hay dos entidades públicas que construyen ciclo-infraestructura: el Instituto de Desarrollo Urbano (en andén) y la Secretaría Distrital de Movilidad (en vía vehicular). En segundo lugar, el periodo de cada administración de la alcaldía de Bogotá ha tenido ajustes en su duración, así como cambios por renunciaciones del alcalde electo. En tercer lugar, debido a los procesos de contratación, es probable que algunos de los proyectos iniciados durante un período de alcaldía sean culminados en el período siguiente. Por lo anterior, la Figura 1-3 presenta los km de ciclo-infraestructura construidos durante los últimos 26 años en Bogotá, desde 1995 hasta mayo de 2021, y precisa que los periodos con la misma trama corresponden a periodos de alcaldía con el mismo alcalde.

Figura 1-3 Ciclo-infraestructura construida en Bogotá durante 1995-2021



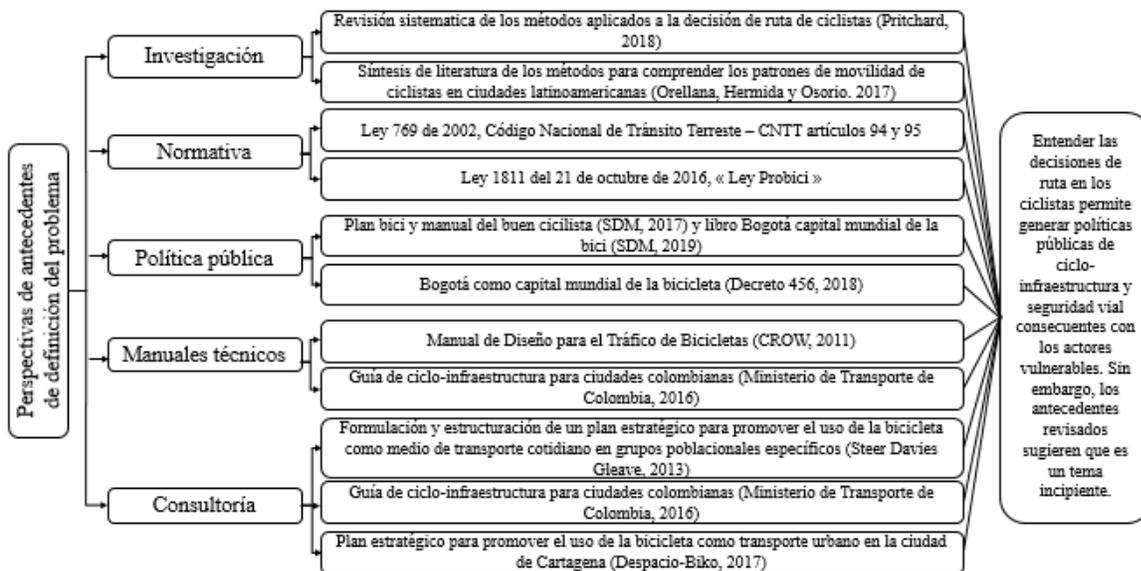
Fuente: Elaboración propia a partir de *Bicycle Account* (2014) y Secretaría Distrital de Movilidad (2019, 2020 y 2021)

Desde la pandemia por COVID-19, la bicicleta se ha considerado como un medio de transporte bioseguro y la infraestructura temporal es una oportunidad para incentivar su uso

(Kraus y Koch, 2021). Por esta razón, Bogotá tuvo 117 km de ciclo-infraestructura temporales (Secretaría Distrital de Movilidad, 2020). 21 km, de los 117 km iniciales, fueron construidos como permanentes posteriormente, y distribuidos en dos segmentos viales: en la Carrera 7 y en la Calle 13, para un total de 572 km construidos en Bogotá (Secretaría Distrital de Movilidad, 2021).

Con la demanda en aumento asociada al uso de la bicicleta, el diagnóstico en seguridad vial y la ciclo-infraestructura en Bogotá adquieren mayor relevancia. La Figura 1-4 representa los antecedentes revisados en este estudio desde cinco perspectivas: investigación, normativa, política pública, manuales técnicos y consultoría.

Figura 1-4: Perspectivas de antecedentes sobre ciclistas y el uso de la bicicleta



En la investigación, el uso de la bicicleta ha sido relevante durante la última década como lo presenta la síntesis de literatura del estudio de los patrones de la movilidad ciclista en Latinoamérica (Orellana, Hermida y Osorio, 2017) y la revisión sistemática de investigaciones publicadas, desde 2010 hasta 2017, sobre métodos de estudio de ruta de ciclistas (Pritchard, 2018).

Desde la normativa en Colombia, la bicicleta es identificada como medio de transporte en el Código Nacional de Tránsito Terrestre (Ley 769 de la República de Colombia, 2002) y, específicamente, en la ley que otorga incentivos para promover el uso de la bicicleta en el territorio nacional (Ley 1811 del Congreso de Colombia, 2016).

A partir del enfoque de política pública en Bogotá, el programa Plan Bici tiene como objetivo convertir la bicicleta en el modo de transporte preferido por los ciudadanos (Secretaría Distrital de Movilidad, 2016); así como consolidar a la ciudad como capital mundial de la bicicleta (Decreto 456 de Alcaldía Mayor de Bogotá, 2018). Inicialmente, se buscó hacer un diagnóstico de la ciudad y una proyección del uso de la bicicleta generada en el libro Bogotá Capital Mundial de la Bici (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2019), en conjunto con proyectos como el Manual del Buen Ciclista (Secretaría Distrital de Movilidad, 2017).

También, los manuales técnicos presentan el contexto de las metodologías para el diseño de ciclo-infraestructura sugeridas desde Holanda (CROW, 2011), recomendadas en Colombia mediante la guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016) y lineamientos técnicos en materia de seguridad vial usados en Bogotá para el diseño y evaluación de ciclo-infraestructura (Secretaría Distrital de Movilidad, 2019).

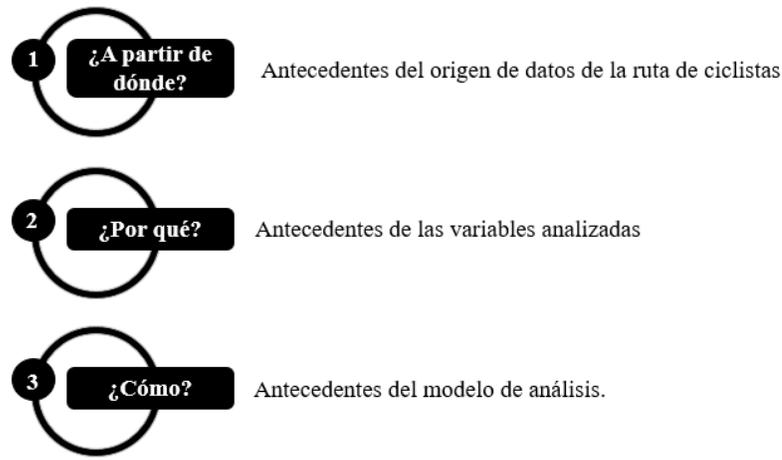
Respecto a la revisión de antecedentes desde la consultoría desarrollada en Bogotá en la última década, son analizados dos informes: “La formulación y estructuración de un plan estratégico para promover el uso de la bicicleta como medio de transporte cotidiano en grupos poblacionales específicos” (Steer Davies Gleave, 2013) y el “Modelo de asignación de transporte no motorizado: bicicleta” (Consultoría de Información Infometrika, 2016). Así mismo, a nivel nacional hubo un ejercicio con aplicaciones móviles como insumo para la caracterización de viajes y usuarios en la ciudad de Cartagena, donde el análisis de los datos fue entre el lunes 23 de enero al lunes 6 de marzo del 2017; en el periodo analizado, 483 usuarios hicieron uso de la aplicación Biko al registrar 5.873 actividades, y recorriendo en total 43.081 kilómetros (Espacio y JB Mobility, 2017).

A partir de los cinco enfoques de antecedentes revisados para Bogotá y Colombia, este estudio también exploró el contexto sobre la caracterización de ciclistas y las políticas públicas a nivel de América Latina y el Caribe para el uso de la bicicleta y encontró que: “aunque la mitad de las ciudades consultadas disponen de departamentos encargados de impulsar el uso de la bicicleta, existe un alto déficit en los datos sobre el ciclismo urbano y en la disponibilidad de información para los usuarios” (Ríos, Taddia, Pardo y Lleras, 2015), y “al igual que peatón, el ciclista es un usuario vulnerable, las políticas públicas deberían estructurarse a partir de sus necesidades específicas, su seguridad y de las condiciones de infraestructura que potencialicen todas sus ventajas” (Universidad de los Andes y Hill Consulting, 2017).

A nivel internacional, la autora de este estudio identificó que, en las últimas dos décadas y con mayor alcance de investigación desde 2010, el análisis sobre el uso de la bicicleta ha tenido un enfoque hacia la ruta del ciclista y sus decisiones, según la revisión de investigaciones publicadas en inglés acerca de los métodos para estudiar la decisión de ruta en bicicleta, desde 2010 hasta 2017 (Pritchard, 2018); aunque la revisión de Pritchard sobre 2.744 publicaciones no incluye las publicaciones en español ni las generadas desde 2018, sí permite dimensionar cuáles, cuántas, cómo han sido estudiadas las rutas de ciclistas, la importancia para la academia y la aplicación de métodos en políticas públicas de fomento para la bicicleta. Razón por la que en el presente trabajo de grado se priorizan las referencias y aportes identificados durante el siglo XXI.

Por lo anterior, para la revisión de rutas de ciclistas y definición del problema, este estudio precisó tres preguntas enunciadas en la Figura 1-5.

Figura 1-5 Preguntas para la revisión de decisión de ruta de ciclistas



En primer lugar, la Tabla 1-1 presenta los antecedentes del origen de datos de la ruta de ciclistas; incluye desde la descripción de ruta del usuario mediante una encuesta hasta realidad virtual, donde el método con más publicaciones corresponde al de origen de datos a partir de dispositivos GPS según el análisis de publicaciones en inglés realizado como estudio doctoral por Pritchard (2018). Sin embargo, se precisa que el término general para referirse a los registros de ruta de aplicaciones móviles es GNSS *Global Navigation Satellite System* que traduce Sistema Global de Navegación por Satélite. Por lo anterior, en este documento se usan las siglas GPS para referirse a los registros de geoposicionamiento obtenidos a partir del GNSS en la aplicación móvil Biko.

Tabla 1-1 Categorías de clasificación de origen de datos para analizar rutas de ciclistas

Categoría	Descripción	Publicaciones
Dispositivos GPS	Incluye GPS en cascos o en relojes deportivos, pero no tiene en cuenta GPS en <i>smartphone</i> ni <i>crowdsourcing</i>	47
Descripción de la ruta por el usuario	La descripción de la ruta puede ser registrada de forma verbal/escrita (6), dibujada (15) o indicada en la web (2)	23
GPS en <i>smartphone</i>	Usuarios que hacen parte de la investigación y registran la ruta con el <i>smartphone</i> o aplicaciones desarrolladas para la investigación específica	20
<i>Crowdsourcing</i>	Corresponde a las bases de datos de aplicaciones deportivas para <i>smartphone</i> (Strava, Sports Tracker y Endomondo), aplicaciones orientadas a la investigación (Fiets Telweek, BikePRINT, RiderLog) o datos de Sistemas de Bicicletas Públicas	13

Categoría	Descripción	Publicaciones
Seguimiento del viaje	Encuesta o acompañamiento durante el recorrido (3) o dispositivos instalados en las bicicletas de quienes hacen el seguimiento del recorrido (1)	4
Cámaras	Cámaras de vídeo en el casco del ciclista	3
Realidad virtual	Registro de la ruta a través de un simulador de la ciudad	2

Fuente: Adaptado a partir de Pritchard (2018)

En segundo lugar, la Tabla 1-2 precisa los antecedentes de las variables para la caracterización de ciclistas y la decisión de ruta de estos, la revisión de las variables usadas desde 2010 hasta 2015 (Grond, 2016), desde 2010 hasta 2018 (Pritchard, Frøyen y Snizek, 2019), durante 2019 (Romanillos y Gutiérrez, 2020) y durante 2020 (Lißner, Huber, Lindemann, Anke y Francke, 2020) donde de acuerdo con lo consultado, la autora de este estudio propone una agrupación en cuatro enfoques: ciclista, viaje, entorno e infraestructura.

Tabla 1-2 Variables revisadas para caracterización de ciclistas y decisión de ruta

Enfoque	Variable analizada	2010 Suiza Menghini et al	2010 Canadá Winters et al	2011 Holanda CROW	2011 EE.UU. Hood et al	2012 EE.UU. Broach et al	2014 Brasil Segadhila et al	2015 EE.UU. Katri	2019 España Romanillos y Gutiérrez	2020 Alemania Lißner et al
Ciclista	Edad		*		*	*			*	*
	Género		*		*	*	*		*	*
	Ingresos		*			*				
	Experiencia como ciclista					*				
	Percepción de comodidad				*	*				
	Frecuencia como ciclista		*			*				*
	Historial de siniestros viales						*			
Viaje	Distancia de viaje	*	*		*	*	*	*	*	*
	Tiempo de viaje						*		*	*
	Tiempo de espera antes de un cruce			*						
	Velocidad promedio	*					*			*
	Giros a derecha e izquierda				*	*		*		

Enfoque	Variable analizada	2010 Suiza Menghini et al	2010 Canadá Winters et al	2011 Holanda CROW	2011 EE.UU. Hood et al	2012 EE.UU. Broach et al	2014 Brasil Segadhila et al	2015 EE.UU. Katri	2019 España Romanillos y Gutiérrez	2020 Alemania Lißner et al
Entorno	Propósito de viaje				*	*	*		*	*
	Tipo de bicicleta								*	
	Hora de viaje						*	*		
	Árboles y sombra		*				*			
	Uso del suelo		*		*					
	Clima								*	
	Crimen					*				
	Altitud								*	
Infraestructura	Densidad de población		*							
	Equipamientos para bicicleta	*	*		*	*	*	*		
	Pendiente del terreno	*	*		*	*		*	*	
	Tipo de pavimento						*		*	
	Volumen de tráfico			*	*	*	*	*		
	Número y ancho de carriles				*		*			
	Límite de velocidad				*		*		*	
	Parqueo en vía						*			
	Intersecciones			*					*	
Tipo de control del tráfico (semáforo o señalización)	*	*		*	*	*	*	*		
Total	27	5	11	3	13	14	14	7	13	7

Fuente: Elaboración propia a partir de Grond (2016), Pritchard et al (2019), Romanillos y Gutiérrez (2019) y Lißner et al (2020)

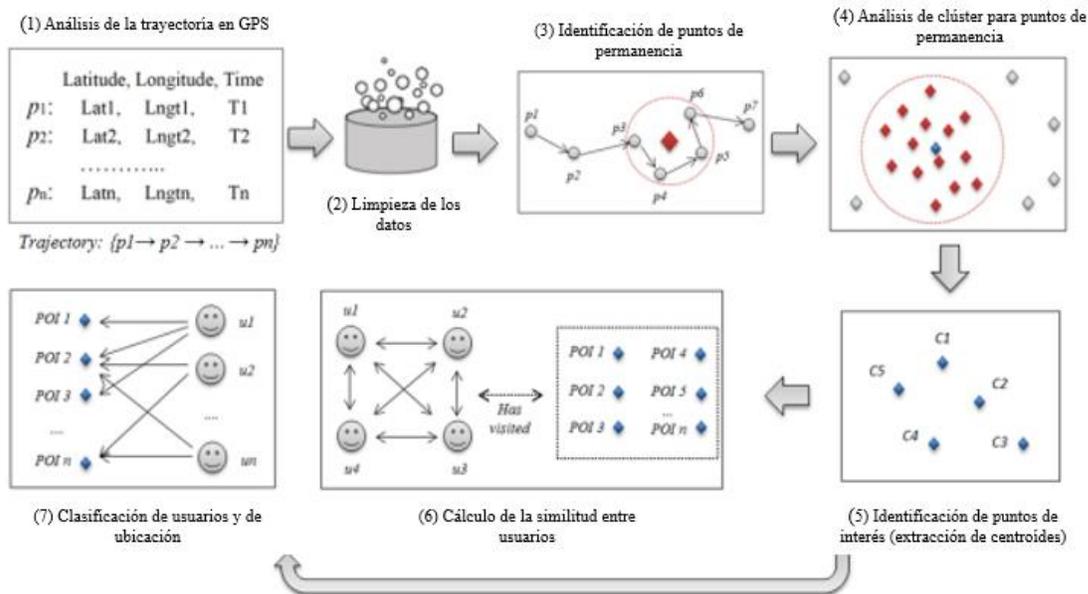
En tercer lugar, de acuerdo con los métodos para el análisis de decisión de ruta de ciclistas y el manejo de datos:

“(…) la ingeniería de transporte busca la mejor disposición de las vías (oferta) para satisfacer las necesidades de diversos usuarios (demanda) y lo hace de manera

económica. Como la oferta y la demanda no son determinísticas, es útil la probabilidad, estadística y estimaciones (Ang y Tang, 2006; Benjamin and Cornell, 1970). Ahora, ante una comprensión de la naturaleza incierta y estocástica de las diversas variables que afectan a la oferta y la demanda es esencial usar la estadística descriptiva” (Spiegelman, Sug Park y Rilett, 2010).

Así mismo, desde la exploración de los antecedentes del tratamiento de registros GPS, los registros de rutas tienen una metodología sugerida (Alves Peixoto, 2013) donde los procesos son presentados en la Figura 1-6.

Figura 1-6 Metodología de tratamiento de datos de registros GPS



Fuente: Traducido a partir de Alves Peixoto (2013)

En complemento, los métodos identificados para analizar las variables, los patrones de viaje y la decisión de ruta de ciclistas corresponden a: análisis de clúster (Romanillos, Zaltz Austwick, Ettema y De Kruijf, 2016); modelo Logit Binomial con el parámetro de comparación de ruta más corta en Países Bajos (Bernardi, La Paix y Geurs, 2018);

regresiones lineales en estudios de caso sobre la bicicleta en Estados Unidos (Ziijing y Wei, 2020) y en Polonia (Pazdan, Kiec y D'agostino, 2021).

Finalmente, de acuerdo con lo revisado en la sección 1.1., la motivación de esta investigación es profundizar en las necesidades de los ciclistas y en sus decisiones según variables de seguridad vial y ciclo-infraestructura para generar alternativas de análisis que permitan mejorar las políticas públicas de promoción de la bicicleta en Bogotá; así como ser un referente sobre el estudio de la bicicleta mediante origen de datos de registros GPS en aplicaciones móviles y presentar un avance en la aplicación de métodos cuantitativos para el medio de transporte bicicleta.

1.2 Definición del problema

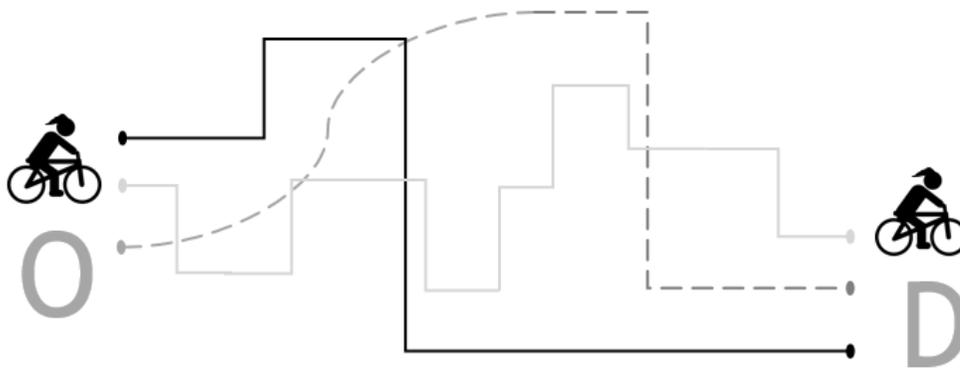
Las políticas públicas en Colombia para ciclistas, usualmente, tienen origen de datos a partir de las variables y metodologías para los vehículos motorizados, según lo identificado en los antecedentes. Adicionalmente, los ciclistas son usuarios que recurren a usar tanto la infraestructura peatonal como la vehicular y no necesariamente cumpliendo los sentidos de flujo o normas; esto implica que, para tomar decisiones sobre los ciclistas en Bogotá, hay supuestos que limitan la concepción de lo que en realidad ocurre en el espacio público.

Por otra parte, los datos de siniestralidad están subregistrados debido a que los usuarios y la autoridad no reconocen la necesidad de informar sobre los siniestros o colisiones que involucren ciclistas a menos que resulten fallecidos o lesionados graves, esto fue identificado según un análisis de la Unión Europea (Polders, E. y Brijs, T., 2018) donde precisan que los ciclistas víctimas de siniestralidad tienen la probabilidad más baja de ser denunciados por la policía (especialmente cuando están involucrados en siniestros de un solo usuario) y se complementa con una revisión realizada en Estados Unidos por *The Federal Highway Administration - FHWA* (Carter, 2017) donde evidencian que una de las limitaciones al analizar siniestralidad son los datos ausentes debido a siniestros no informados.

La Figura 1-7 representa un par Origen-Destino (desde O hasta D) donde hay múltiples opciones de rutas, lo que permite que el ciclista a partir de decisiones individuales, según

variables que ha identificado y considera importantes, decide cuál ruta elegir y, posiblemente, repita la decisión. La ruta decidida es aquella registrada en las aplicaciones móviles y junto con la información de contexto social, de seguridad, de infraestructura y de ciudad vinculadas, podrían contribuir a la creación de variables para comprender los patrones de decisión de ciclistas e incluirlos en las políticas públicas de ciudad.

Figura 1-7 Esquema de opciones de ruta de ciclistas



Por lo anterior, el aprovechamiento de las aplicaciones móviles podría ser la oportunidad usada, por primera vez en Bogotá, para entender las decisiones de ruta de los ciclistas, complementadas con recursos geoespaciales y análisis estadístico y, a su vez, creación de las variables implicadas para contribuir a la toma de decisiones de diseño, promoción y mejoría de la movilidad sostenible, consecuentes con las necesidades de los actores vulnerables y a partir de métodos cuantitativos replicables con oportunidades de mejora constantes.

1.3 Pregunta de investigación e hipótesis

La principal pregunta de investigación en este estudio es: ¿cuáles son los factores que influyen la decisión de ruta de los ciclistas en Bogotá? y las tres hipótesis planteadas son:

- Los ciclistas tienen en cuenta variables de seguridad vial y ciclo-infraestructura para decidir su ruta.
- Los registros GPS de ruta de ciclistas junto con bases de datos geoespaciales permiten identificar patrones de decisión de ruta de ciclistas.

- Los métodos cuantitativos y estadísticos, a partir de aplicaciones móviles, podrían reemplazar las encuestas para analizar las necesidades de los ciclistas.

1.4 Objetivos de investigación

Este estudio incluye un objetivo general y cinco objetivos específicos.

1.4.1 Objetivo general

Analizar la decisión de ruta de los ciclistas al considerar atributos de seguridad vial y ciclo-infraestructura a partir de registros GPS de una aplicación móvil en Bogotá.

1.4.2 Objetivos específicos

- I. Analizar estadísticamente los registros GPS de ruta de ciclistas con el propósito de detectar patrones de viajes regulares.
- II. Determinar las variables y/o atributos que conforman la base de datos para explicar las dimensiones de seguridad vial y ciclo-infraestructura que fundamentarán el análisis de elección de ruta.
- III. Identificar mediante análisis de clúster, de la base de datos, agrupaciones naturales de las variables con el propósito de categorizarlas y sintetizar el análisis estadístico de la elección de ruta.
- IV. Entender la decisión de ruta de los ciclistas a partir de un Análisis de Correspondencias Múltiples que involucra atributos de las condiciones de seguridad vial y ciclo-infraestructura de la ruta.
- V. Comparar los hallazgos resultantes de este estudio con la Encuesta de Movilidad 2019 sección ciclistas, para la decisión de ruta.

1.5 Metodología

La Tabla 1-3 presenta cinco fases de la metodología; estas corresponden a un respectivo método y producto que permitirá llevar a cabo los cinco objetivos específicos de este estudio.

Tabla 1-3 Fases del método de la propuesta

Fases asociadas a los objetivos específicos	Método	Producto
I. Analizar estadísticamente los registros GPS de ruta de ciclistas con el propósito de detectar patrones de viajes regulares.	Encadenar los puntos de ruta de GPS y mediante herramientas GIS representar los datos, construir la base de datos geográficos.	Rutas con limpieza de datos y articulación con otras bases de datos de seguridad vial y ciclo- infraestructura.
II. Determinar las variables y/o atributos que conforman la base de datos para explicar las dimensiones de seguridad vial y ciclo- infraestructura que fundamentarán el análisis de decisión de ruta.	Análisis de estadística descriptiva	Base de datos de rutas con pares O-D y con análisis de estadística descriptiva de cada una de las variables creadas.
III. Identificar mediante análisis de clúster, de la base de datos, agrupaciones naturales de las variables con el propósito de categorizarlas y sintetizar el análisis estadístico de la decisión de ruta.	Análisis de clúster	Base de datos con variables categóricas construidas a partir de análisis de clúster
IV. Interpretar un Análisis de Correspondencias Múltiples a partir de los atributos de seguridad vial y ciclo- infraestructura para entender la decisión de ruta de los ciclistas	Análisis de Correspondencias Múltiples	Representación y análisis de variables categóricas de la decisión de rutas de ciclistas
V. Comparar los hallazgos resultantes de este estudio con la Encuesta de Movilidad 2019 sección ciclistas, para la decisión de ruta.	Comparación de bases de datos	Discusión transversal en el desarrollo de los objetivos I, II y III entre la Encuesta Movilidad sección ciclistas y el presente estudio

1.6 Alcance

La muestra por analizar será de Bogotá. De acuerdo con la revisión de literatura, respecto a los métodos de estudio para las decisiones de ruta de ciclistas y de la pregunta a resolver, esta propuesta tiene **un alcance explicativo y descriptivo**. Este tipo de alcance está dirigido a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales, como su nombre lo indica. El enfoque es explicar por qué ocurre un fenómeno (Hernández Sampieri, 2014). Por tanto, esta investigación inicia con un alcance exploratorio, en el intermedio corresponde a ser descriptiva y termina como explicativa.

1.7 Contribución al estado del conocimiento y limitaciones

La investigación propuesta contribuye a entender estadísticamente cómo las variables de seguridad vial y ciclo-infraestructura inciden en la decisión de ruta del ciclista, lo cual tiene aplicación en el enfoque de las políticas públicas de movilidad sostenible, programas de disminución de siniestros, priorización de rutas con ciclo-infraestructura, condiciones para la adecuación y mantenimiento de la ciclo-infraestructura existente, promoción del uso de la bicicleta y optimización de recursos humanos y económicos para la identificación de necesidades de los ciclistas.

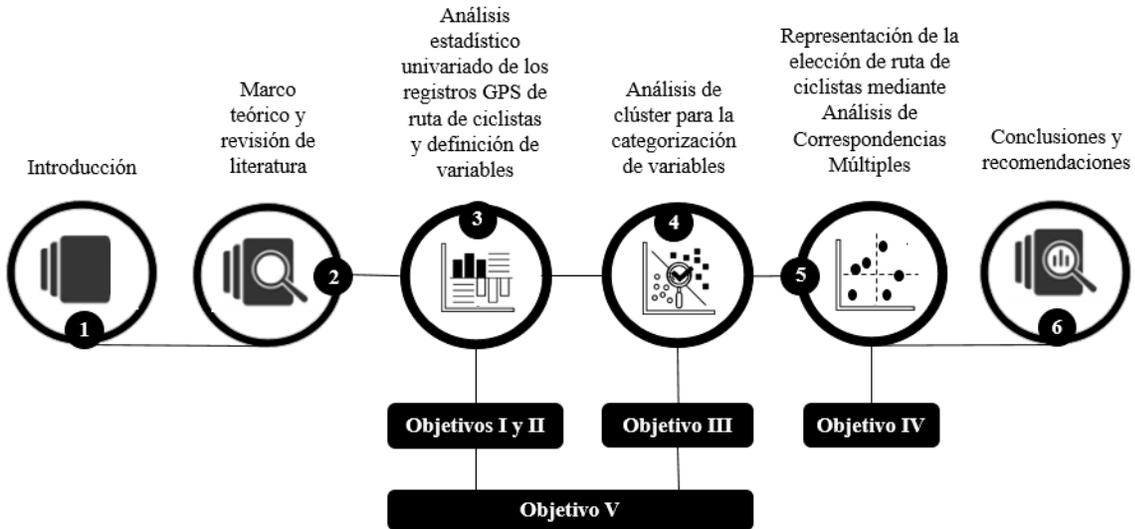
Así mismo, las limitaciones encontradas corresponden a que las bases de datos de aplicaciones móviles tienen un costo monetario; sin embargo, este estudio pretende mostrar un método para visibilizar su uso y disminuir el tiempo de análisis para las entidades públicas que prefieran implementarlo, además de demostrar que su utilidad sobrepasa los métodos actuales para analizar las necesidades de los ciclistas.

Aunque este estudio tuvo en cuenta la ciclo-infraestructura, para próximos estudios podría complementarse con la base de datos georreferenciada de los ciclo-parqueaderos públicos, privados y del sistema de transporte público para intercambio modal.

1.8 Contenido de esta investigación

La Figura 1-8 presenta la estructura de este estudio para cumplir con los cinco objetivos específicos planteados en la sección 1.4 e incluye seis capítulos: 1. Introducción, 2. Marco teórico y revisión de literatura, 3. Análisis estadístico de los registros GPS de ruta de ciclistas y definición de variables, 4. Análisis de clúster para la categorización de variables, 5. Representación de la elección de ruta de ciclistas mediante Análisis de Correspondencias Múltiples, y 6. Conclusiones y recomendaciones.

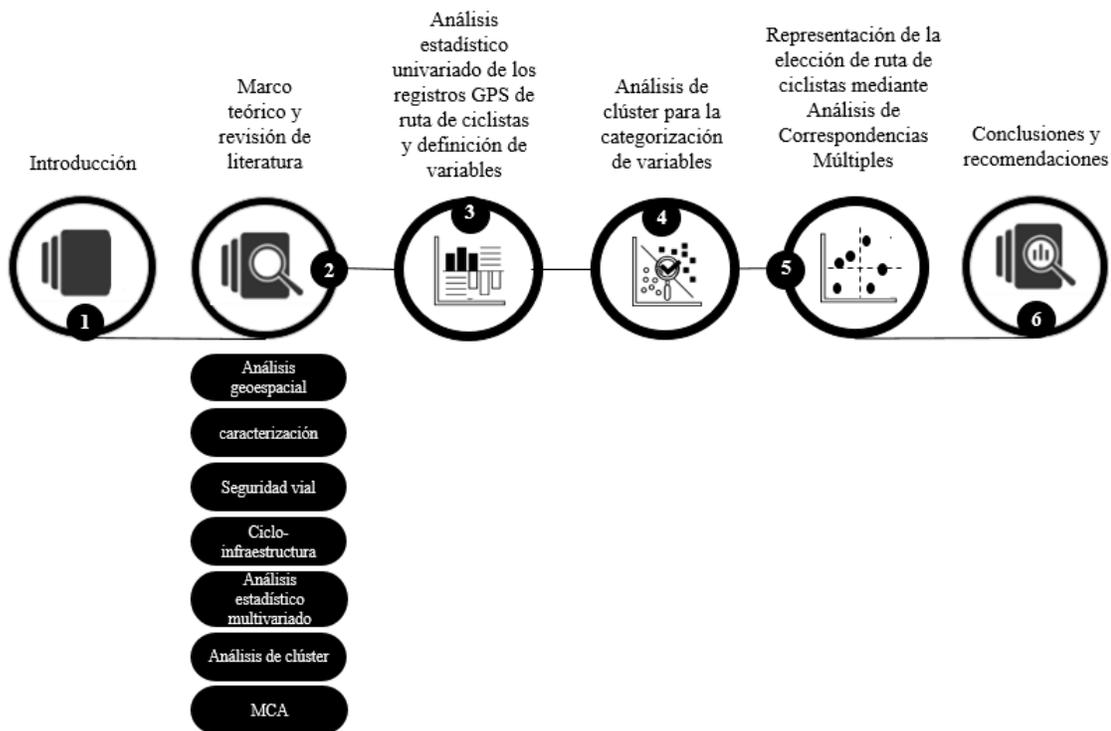
Figura 1-8 Diagrama resumen de este estudio



2 Marco teórico y revisión de literatura

En concordancia con la metodología utilizada, siete temáticas fueron seleccionadas para respaldar el fundamento teórico en esta investigación: análisis geoespacial de rutas de ciclistas, caracterización de ciclistas, seguridad vial para ciclistas, ciclo-infraestructura, estudio de la bicicleta mediante análisis estadístico multivariado, análisis de clúster para el uso de la bicicleta, y Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA). Este capítulo expone estas temáticas, en igual número de secciones, para consolidar un marco conceptual soportado en estudios de caso como referentes de la revisión de literatura. Cada sección precisa su utilidad y alcance en este estudio. La Figura 2-1 presenta el diagrama resumen de este documento, destacando la importancia del presente capítulo.

Figura 2-1 Diagrama resumen del capítulo 2



2.1 Análisis geoespacial de rutas de ciclistas

El análisis geoespacial de rutas de ciclistas depende del origen de la información, usualmente desde aplicaciones móviles. Lee y Nese (2021) en su revisión de literatura, sobre una de las aplicaciones móviles para analizar ciclistas, precisan:

“El monitoreo de las rutas en bicicleta ya no se limita a las fuentes tradicionales, como las encuestas y conteos de viajes. Strava, un popular rastreador de actividad física ha enriquecido las oportunidades de investigación sobre bicicletas durante los últimos cinco años. (...)

Los datos de Strava Metro tienen potencial, aunque finito, de usarse para: identificar patrones de viaje, estimar la demanda de viajes, analizar la elección de ruta, controlar la exposición en modelos de siniestros y evaluar la exposición a la contaminación del aire. Sin embargo, implica retos como: la escasa representatividad de la población general, el sesgo hacia y fuera de ciertos grupos, la falta de detalles demográficos y de datos de viaje a nivel individual. (...)

Estos impiden que los investigadores dependan por completo de esta fuente de datos y se identificó que el uso cruzado con otras fuentes y la validación de la confiabilidad con datos oficiales podrían mejorar su potencial.” Traducido a partir de Lee y Nese Sener (2021).

En concordancia, tal como se presenta en la Tabla 2-1, a partir de un estudio geoespacial sobre ciclistas en Noruega (Pritchard, Frøyen y Snizek, 2019) las bases de datos geográficas y disponibles en el territorio son fundamentales para la creación de una red de información que permita articular o crear variables para analizar la ruta de los ciclistas a nivel geoespacial, esto implica la revisión de la disponibilidad de los datos de entrada y el tipo del dato.

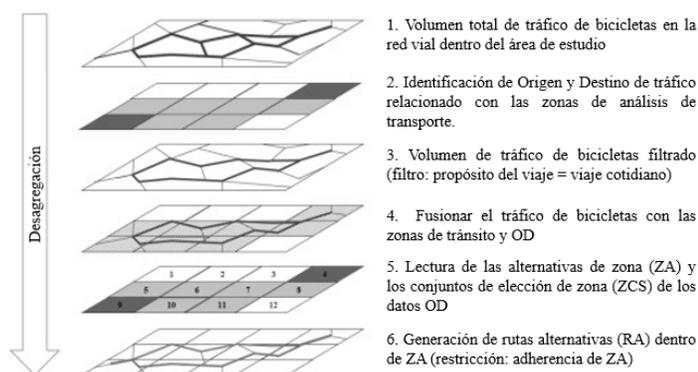
Tabla 2-1 Fuentes de información de una red geoespacial para el análisis del uso de la bicicleta

Fuente del dato	Conjunto de datos de entrada	Tipo de dato
<i>Norwegian Mapping Authority y Norwegian Public Roads Administration</i>	Red de vías con segmentos y topografía	Base de datos de polilíneas centradas de las vías
<i>Norwegian National Road</i>	Volúmenes de tráfico, límites de velocidad y ancho de carril	ArcMAP API
Fotografías aéreas	Segmentos viales faltantes para peatones y ciclistas. Información complementaria de la red (estacionamiento en ciclo-infraestructura, ciclo-infraestructura en andén)	Base de datos (edición manual)
Encuesta	Mapa de rutas seleccionadas en bicicleta	GeoJSON

Fuente: Traducido a partir de Pritchard, Frøyen y Snizek, (2019)

Por lo anterior, a nivel internacional se ha identificado que los registros en Strava incluyen el volumen total de tráfico de bicicletas (número de viajes) en los segmentos viales de la red geoespacial proporcionada (Huber y Lißner, 2019); lo que implica un proceso de desagregación y tratamiento de datos para la identificación de cada viaje con su respectiva ruta, zona de análisis de transporte y par O-D como se evidencia en la Figura 2-2. Además, esto puede variar según la aplicación móvil utilizada.

Figura 2-2 Proceso de desagregación y tratamiento geoespacial de registros de ciclistas en Strava



Fuente: Traducido a partir de Huber y Lißner, (2019)

De esta manera, el análisis geoespacial ha sido aplicado, entre otros, para los siguientes estudios con las respectivas variables, resumidos en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Variables y enfoques en estudios con análisis geoespacial de ciclistas

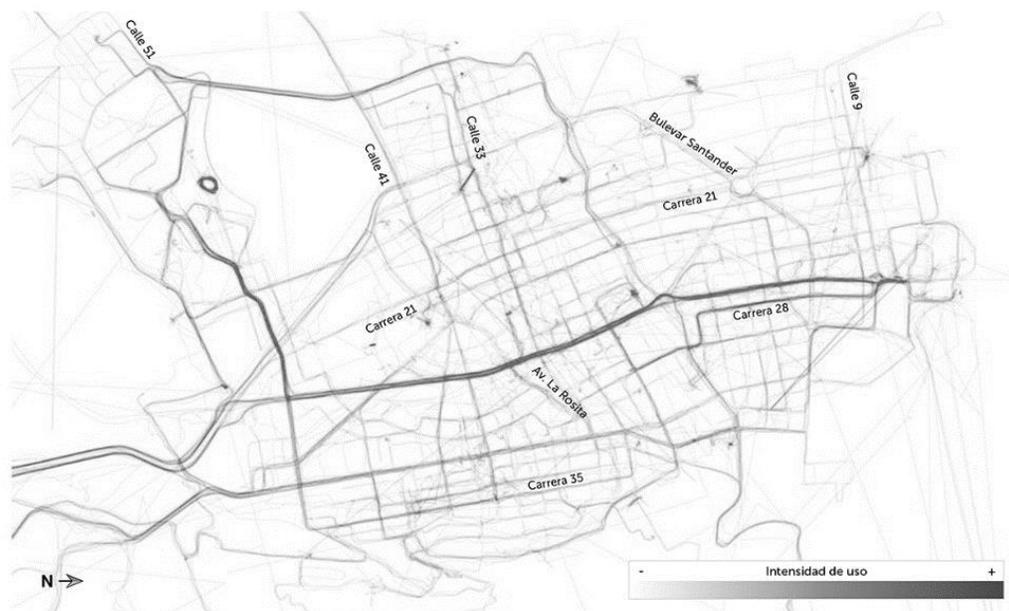
Enfoque	Descripción del estudio con análisis geoespacial	Variables	Fuente
Infraestructura	Análisis de interacción entre la infraestructura para bicicletas y las condiciones climáticas para los viajes en bicicleta de Strava cada hora durante un año	Clima: Lluvia y temperatura	(Hong, McArthur y Stewart, 2020)
		Infraestructura: Nada en vía, corredor de bus, tráfico calmado, demarcación, segregación, compartido fuera de vía, señalizado en vía	
Demanda	Proyección de volúmenes de bicicleta a partir de relación entre viajes registrados en Strava e información georreferenciada disponible	Características de la vía: límites de velocidad, longitud de segmento vial, ancho de carril	(Lin y Fan, Modeling bicycle volume using crowdsourced data from Strava smartphone application, 2020)
		Geometría: pendiente Características sociodemográficas: edad, población, tipo de hogar según censo georreferenciado por zonas Zonificación: Residencial, negocios o uso mixto. Caracterización temporal: Rangos horarios del estudio Instalaciones para bicicleta: ciclo- infraestructura	
Seguridad vial	Desarrollo de Funciones de Desempeño de Seguridad (SPF) para intersecciones ubicadas geográficamente en una ciudad utilizando datos de aplicaciones para bicicletas	Volumen de bicicletas y de tráfico Tipo de vía: arterial, secundaria Tipo de control de tráfico: semáforo, señalización Cantidad de paraderos de bus Uso del suelo	(Chen, Wang, Roll, Nordback y Wang, 2020)

En complemento, en Colombia, Biko app es una aplicación móvil que consiste en que por cada kilómetro recorrido en bicicleta y registrado con el GPS del teléfono móvil, el usuario recibe un Biko; esta es una moneda digital que el usuario puede redimir por descuentos de las marcas patrocinadoras (BIKO, 2018). En mayo de 2015 se lanzó Biko en Bogotá y luego se expandió a Medellín y Bucaramanga; desde mayo de 2016 está en la Ciudad de México y en 2018 en Vancouver, Canadá (Seguro Bici Argentina, 2018).

A escala de ciudad, un ejemplo del uso de la aplicación Biko como herramienta de análisis geoespacial de ciclistas para política pública fue en Bucaramanga, Santander, durante 2018

con el apoyo de ONU Hábitat y Fundación Despacio. Este ejercicio identificó por dónde se movían los ciclistas a partir de una alianza de fomento de uso de la aplicación móvil; uno de los resultados fue el mapa de intensidad de uso de la bicicleta representado en la Figura 2-3, generado a partir de 1.415 viajes, cuyo insumo fue tenido en cuenta en la selección de corredores priorizados para el año 2019 (Alcaldía de Bucaramanga, 2018).

Figura 2-3 Mapa de intensidad de uso de la bicicleta en Bucaramanga a partir de registros en Biko app



Fuente: Alcaldía de Bucaramanga (2018)

Finalmente, para esta investigación se tuvo en cuenta la inclusión de diversidad de fuentes de información geográfica para potencializar el uso de los registros GPS de aplicaciones móviles, incluso desde entidades distritales de Bogotá. Se generó un acuerdo para disponer de la base de datos anónimos de la aplicación móvil Biko, para el mes de febrero de 2018 en Bogotá; también se realizó un tratamiento multicapas para la generación de rutas, zonificación y pares O-D en cada uno de los registros y se crearon variables desde diferentes enfoques de análisis a partir de la base de datos geoespacial.

2.2 Caracterización de ciclistas

Analizar el uso de la bicicleta implica revisar quiénes y cuáles condiciones generan la demanda. Por tanto, para la caracterización de ciclistas urbanos, varios estudios proponen categorías generalmente relacionadas con la frecuencia, el propósito del viaje o la motivación (Félix, Moura y Clifton, 2017). A continuación, la Tabla 2-3 resume 19 estudios a nivel internacional para generar perfiles de ciclistas.

Tabla 2-3 Tipologías de caracterización de ciclistas

Año	Ubicación	Fuente	Cdad.	Categorías	Fundamento	Método
1994	Estados Unidos	FHWA, U.S. <i>Department of Transportation</i>	3	Ciclista avanzado, ciclista básico y niños	Experiencia, confianza en el tráfico	No aplica
2001	Reino Unido	<i>Transportation Research Laboratory, Davies et al.</i>	9	Ciclistas comprometidos, ciclistas regulares, ciclistas ocasionales, <i>toe-dippers</i> , el irreflexivo, el consciente de sí mismo, el no convencido, <i>to needers</i> , muchachos jóvenes	Frecuencia y propósito	Encuesta (300) Análisis de clúster
2003	Suecia	Bergström and Magnusson	4	Ciclista de invierno, ciclista solo en verano, ciclista poco frecuente, nunca ciclista	Frecuencia y condiciones climáticas	Encuesta (1005)
2006 y 2011	Portland, Estados Unidos	Geller; Dill y McNeil	4	Fuerte y valiente, entusiasmado y confiado, interesado, pero preocupado, de ninguna manera - no sé cómo	Miedo y confianza en el tráfico, relación con la bicicleta. Nivel de comodidad andar en bicicleta en diferentes tipos de instalaciones, interés en el ciclismo para desplazarse, capacidad física para la bicicleta	Encuesta (902)
2007	Sidney, Australia	City of Sidney Council	9	Niños, ciclistas locales, viajeros, ciclistas estudiantes adultos, ciclistas recreativos, ciclistas	Edad, propósito, trabajo	No aplica

Año	Ubicación	Fuente	Cdad.	Categorías	Fundamento	Método
				deportivos, ciclistas turistas, mensajeros en bicicleta, no ciclistas		
2008	Europa	Mayne	4	Ciclista competitivo, ciclista regular o utilitario, ciclista recreativo, ciclista potencial (o no ciclista)	Propósito	No aplica
2008	Wales, Reino Unido	Welsh Department for Transportation	3	Ciclista diario, deportivo, recreativo y ocio	Propósito	No aplica
2009	Sidney, Australia	Taverner Research	4	No ciclista, ciclista potencial, ciclista infrecuente, ciclista	Bicicleta propia, interés, frecuencia	Encuesta (1224)
2009	Bélgica	Belgian Road Traffic Research Centre	3	Frecuente, ocasional, inexperto	Frecuencia, experiencia	No aplica
2010	Vancouver, Canadá	Winters <i>et al.</i>	4	Potencial, ocasional, frecuente, ciclista regular	Frecuencia al año	Encuesta (1402)
2010	Reino Unido	Gatersleben y Haddad	4	Responsable, por estilo de vida, <i>commuter, happy-go- lucky</i>	Comportamiento, motivación y características	Encuesta (244), análisis factorial
2011	Montreal, Canadá	Larsen y El- Geneidy	3	Ocasional, en buenas condiciones; regular, en condiciones promedio; frecuente, con todas las condiciones	Frecuencia, experiencia, infraestructura	Encuesta (2917), autodeterminación
2011	Países bajos	Heinen <i>et al.</i>	3	Ciclista de tiempo completo, ciclista de tiempo parcial, no ciclista	Frecuencia, propósito	Encuesta (4299)
2011	Portugal	Institute of Mobility and Land Transport	3	Frecuente, ocasional, inexperto	Experiencia, percepción del riesgo/propósito	Combinación entre Bélgica y Wales
2012	Lisboa, Portugal	Félix	3	Viajero diario, principiante, deporte/fines de semana	Edad, género, propósito, experiencia y uso de casco	Encuesta (892), análisis de clúster
2012	Dar-es- Salaam, Tanzania	Nkurunziza <i>et al.</i>	6	Pre-contemplación, contemplación, preparado para la acción, acción, mantenimiento, recaída	Frecuencia y motivaciones	Encuesta (598)
2014	Países bajos	Kroesen and Handy	4	No ciclista, ciclista sin trabajo, todo ciclista, ciclista diario	Frecuencia, propósito	Panel de datos (1969), análisis de clúster

Año	Ubicación	Fuente	Cdad.	Categorías	Fundamento	Método
2014	Montreal	Damant-Sirois et al.	4	Ciclista dedicado, ciclista usando camino, utilitario en buen clima, ciclista ocioso	Frecuencia, propósito, condiciones climáticas, infraestructura	Encuesta (2004), análisis factorial de 35 variables
2014	Australia	Austroads	7	Niños de escuela primaria, niños de escuela secundaria, recreativos, diarios, utilitarios, turistas, deportivos	Propósito, características de conducción, necesidades de infraestructura	Basado en la encuesta de Sidney de 2007

Fuente: Traducido a partir de Félix, Moura y Clifton (2017)

Respecto a Latinoamérica, de acuerdo con una revisión de planes, programas y estudios diagnósticos de la movilidad de las principales ciudades, realizado en 2016, se encontró que, adicional a identificar el perfil ciclista, los indicadores que permiten analizar el ciclismo urbano se pueden dividir en 4 categorías (Trejo Alba y Pérez Llerenas, 2016):

- Categoría 1: indicadores que fortalecen el uso de la bicicleta
- Categoría 2: indicadores que generan el uso de la bicicleta
- Categoría 3: indicadores del uso efectivo de la bicicleta
- Categoría 4: indicadores del impacto por el uso de la bicicleta

Por lo anterior, la Tabla 2-4 precisa los indicadores usados para analizar el ciclismo urbano en 13 ciudades y 9 países, específicamente en las categorías 3 y 4 que son las más relacionadas con el perfil ciclista:

Tabla 2-4 Indicadores para analizar el ciclismo urbano en Latinoamérica, categorías**3 y 4**

Indicadores:	País:											Número de ciudades que lo consideran	Incidencia por categoría	Incidencia según total de indicadores		
	Ciudad:															
	Argentina	Brasil	Chile	Colombia	Costa Rica	México	Perú	Uruguay	Venezuela							
	Buenos Aires	Belo Horizonte	Sao Paulo	Santiago	Bogotá	Cartagena	San José	León	Guadalajara	Cd. de México	Lima	Montevideo	Caracas			
<i>3) Los del uso efectivo de la bicicleta</i>																
Días de uso de la bicicleta	•	•	•	•	•									5	15.63%	3.85%
Estacionamientos para bicicletas			•						•			•		3	9.38%	2.31%
Frecuencia de uso de ciclovía				•									•	2	6.25%	1.54%
Distancias recorridas en viajes por nivel de ingreso			•								•			2	6.25%	1.54%
Percepción de respeto de los conductores a las normas			•											1	3.13%	0.77%
Tiempos de viaje en bicicleta por género			•		•									2	6.25%	1.54%
Movilidad y grupos vulnerables			•								•			2	6.25%	1.54%
Pérdidas de tiempo por congestión vehicular			•	•				•					•	4	12.50%	3.08%
Medio de transporte principal		•	•		•			•	•		•		•	6	18.75%	4.62%
Número de desplazamiento en bicicleta		•	•	•							•		•	5	15.63%	3.85%
<i>4) Los del impacto por el uso de la bicicleta</i>																
Número de decesos			•						•				•	3	8.33%	2.31%
Número de bicicletas robadas													•	1	2.78%	0.77%
Participación modal			•											1	2.78%	0.77%
Número de bicicletas vendidas													•	1	2.78%	0.77%
Emissiones de contaminantes atmosféricos			•		•				•		•		•	5	13.89%	3.85%
Medio de mov. según sexo, edad y nivel socioeconómico											•		•	2	5.56%	1.54%
Num. de pns. usuarias de la bicicleta medio de trasp.									•					1	2.78%	0.77%
Participación modal por ingreso mensual del hogar				•										1	2.78%	0.77%
Accidentes de tránsito			•	•				•		•				4	11.11%	3.08%
No. víctimas: heridos graves y heridos leves			•	•				•		•				4	11.11%	3.08%
Número de accidentes en bicicleta (de tráfico)									•				•	2	5.56%	1.54%
Emission de contaminantes			•							•			•	3	8.33%	2.31%
Accidentalidad georeferenciada			•	•										2	5.56%	1.54%
Comportamiento del parque automotor en relac. bicicleta			•	•							•			3	8.33%	2.31%
Comportamiento ciudadano			•	•										2	5.56%	1.54%
Percepción de convivencia en el camino			•											1	2.78%	0.77%
3) Los del uso efectivo de la bicicleta	1	2	8	3	3	2	1	1	1	2	3	0	5	32		24.62%
4) Los del impacto por el uso de la biciclet	0	0	10	2	4	1	0	2	4	3	3	0	7	36		27.69%
Total indicadores por ciudad	1	5	33	9	17	4	4	8	9	9	10	0	21			

Fuente: Trejo Alba y Pérez Llerenas (2016)

En Colombia, el perfil ciclista también ha tenido diferentes enfoques:

En la ciudad de Popayán, se realizó un estudio donde cinco categorías componen el perfil ciclista de acuerdo con el programa al que pertenecería el usuario: 1. Al colegio en bici, 2. A la U en bici, 3. Al trabajo en bici, 4. A todo lado en bici y 5. Perfiles atípicos (Fajardo-Hoyos, Muñoz-Pabón, León-Blanco y Zemante-Chavez , 2019).

En la ciudad de Bogotá, en el año 2013, una consultoría describe el perfil ciclista con base en la Encuesta de Movilidad de Bogotá del año 2011, de acuerdo con características sociodemográficas, patrones de viaje y preferencias. Así mismo, la consultoría estableció una metodología para estimar el ciclista potencial que migraría de otros medios de transporte hacia la bicicleta según las variables duración, motivo, edad y hora (Steer Davies Gleave, 2013). También en Bogotá, recientemente, en otra investigación se realizó un análisis estadístico en función de las características socioeconómicas y de comportamiento de ciclistas, que tuvo como uno de los resultados, la identificación de dos categorías: ciclista reciente (aquellos que empezaron a montar bicicleta desde hace 3 años o menos a la fecha del estudio) y ciclistas experimentados (Rodríguez-Valencia, Rosas-Satizabal, Unda y Handy, 2021).

Finalmente, para esta investigación, la caracterización de ciclista a nivel internacional, Latinoamérica y Colombia permitió orientar la creación de las variables a partir de la base de datos geoespacial y de registros de la aplicación móvil Biko.

2.3 Seguridad vial para ciclistas

A nivel internacional, la Organización Mundial de la Salud describe la magnitud de las muertes y lesiones de ciclistas, los factores de riesgo clave y a su vez la eficacia de las intervenciones de seguridad para ciclistas; estas se presentan en cuatro grupos interrelacionados: velocidad segura, vías seguras, vehículos seguros y usuarios seguros; la efectividad de estas medidas soportada a partir de la contribución a la reducción de muertes y lesiones graves por siniestros viales, así como cambio de comportamiento (World Health Organization, 2020); esto se precisa en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5 Efectividad de intervenciones de seguridad vial para ciclistas

Tipo de medida	Intervención específica	Efectividad en la reducción de muertes y lesiones graves de ciclistas		
		Comprobado	Referencias prometedoras	Evidencia insuficiente
Velocidad segura	Reducir la velocidad de otros vehículos hasta 30 km/h	*		
Vías seguras	Bici carriles segregados con intersecciones	*		

Tipo de medida	Intervención específica	Efectividad en la reducción de muertes y lesiones graves de ciclistas		
		Comprobado	Referencias prometedoras	Evidencia insuficiente
	<i>Off road</i> , caminos compartidos de transporte no motorizado			*
	Carriles para bicicleta en vía		*	
	<i>Boulevard</i> de bicicletas compartidas en vía		*	
	<i>Wide Shoulders</i>			*
	Bici cajón/línea de parada anticipada			*
	Caja de espera de turnos en dos etapas			*
	Señales de bicicletas en las intersecciones			*
	Pasos elevados para bicicletas			*
	Sobrepasos y pasos subterráneos		*	
	Círculos de tráfico			*
	Glorietas		*	
	Desarrollo de red para bicicletas		*	
	Alumbrado público		*	
Vehículos seguros	Luces obligatorias para bicicleta	*		
	Sistemas de espejos mejorados para camiones			*
	Protectores laterales para camiones		*	
	<i>Airbags</i> para usuarios vulnerables en la vía		*	
	Frenado de energía autónomo		*	
	Vehículos automatizados			*
Usuarios más seguros	Casco	*		
	Reglamentación de casco		*	
	Implementación del uso del casco		*	
	Estandarización de casco para bicicleta		*	
	Estrategias no legislativas para aumentar el uso del casco		*	
	Ley de distancia mínima de paso			*
	Ley de prohibición de ciclomotores en los bicarriles		*	
	Uso de ropa de protección			*
	Educación y/o entrenamiento de ciclistas			*
Campañas de comunicación			*	

Fuente: World Health Organization (2020)

Además de las intervenciones con estrategias identificadas, el análisis de siniestros ocurridos en bicicleta ayuda a detectar patrones, como zonas de mayor exposición al riesgo vial o variaciones temporales de siniestralidad; con base en esto, se pueden formular y probar hipótesis sobre la seguridad vial de los ciclistas (Loidl, Wendel y Zagel, 2015). Igualmente, el riesgo de colisión es uno de los términos para dimensionar la seguridad vial para los ciclistas, por tanto, para esta investigación se tuvo en cuenta que:

“Las formas existentes de medir el riesgo de colisión se pueden dividir en cuatro categorías: frecuencias de colisión, colisiones per cápita, tasa de colisiones por ciclista y tasa de colisiones por distancia recorrida.

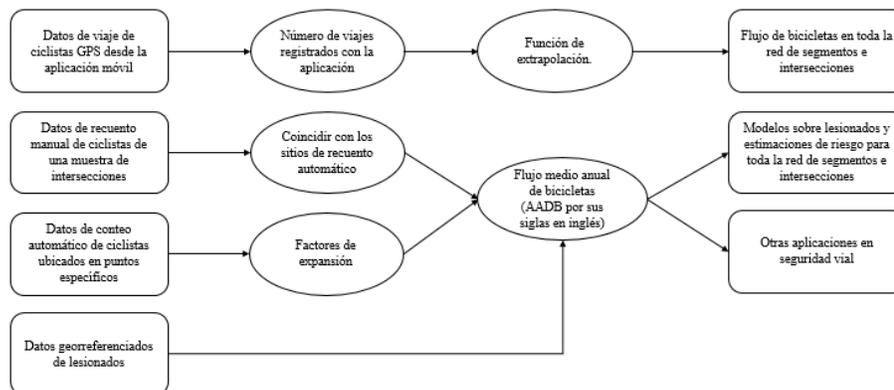
(...)

La tasa de colisiones por distancia recorrida es una relación del número total de colisiones en bicicleta que involucran vehículos motorizados dividido por la distancia recorrida en bicicleta.” Traducido a partir de (Yiannakoulias, Bennet y Scott, 2012).

Así mismo, en un estudio sobre tasas de siniestralidad en bicicleta para Estados Unidos, Reino Unido, Alemania, Dinamarca y Países Bajos, desde el año 1990 hasta 2018, fue evaluada la distancia en bicicleta como la medida de exposición para el denominador de la tasa de mortalidad porque refleja el grado de exposición a posibles peligros del tráfico mejor que el número de viajes u horas en bicicleta. Por ejemplo, un viaje de 5 km, en un entorno de tráfico similar, generalmente representa más exposición a posibles peligros de tráfico que un viaje de 1 km (Buehler y Pucher, 2021).

En complemento a lo anterior, la Figura 2-4 presenta el uso de los registros de ruta en GPS de aplicaciones móviles para el análisis específico de seguridad vial de ciclistas, a partir del estudio realizado en Montreal con la aplicación móvil MonRésoVélo (Strauss, Miranda-Moreno y Morency, 2015); este estudio precisa desde el proceso de la construcción de la red geo-referenciada hasta la definición de la tasa de lesionados en bicicleta por km de segmento analizado.

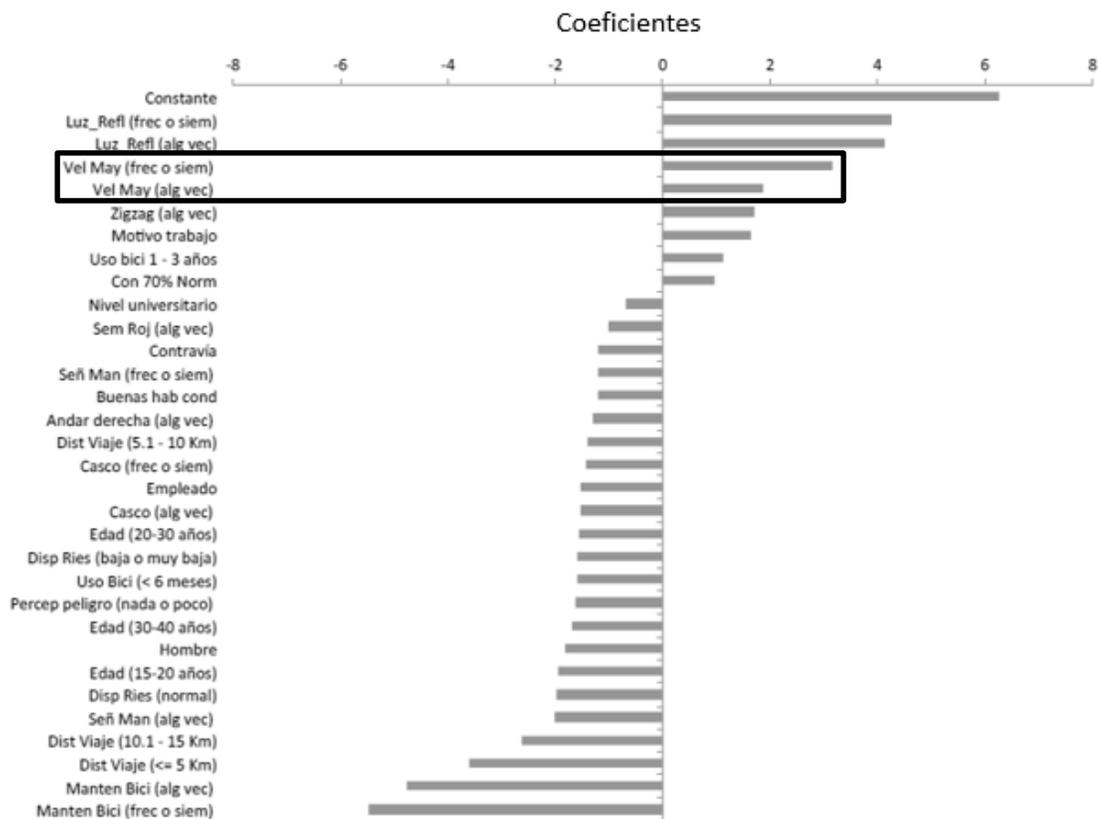
Figura 2-4 Metodología para el uso de registros GPS de rutas de ciclistas en seguridad vial



Fuente: Traducido a partir de Strauss, Miranda-Moreno y Morency (2015)

En específico para Bogotá, en 2015 a partir 167 encuestas validas, se realizó un modelo *logit* binario entre los siniestros de tránsito y diferentes variables: características demográficas del ciclista, características de sus viajes, actitudes frente a viajar en bicicleta en Bogotá y comportamiento como ciclista (Neira Medina, 2015). Uno de los resultados fueron los coeficientes del modelo para cada variable, como lo indica la Figura 2-5, precisando que un coeficiente positivo indica que si se cumplen las características descritas por esa variable hay mayor probabilidad de siniestro, de lo contrario, indica que hay menor probabilidad. También, se evidencia que aparte de la variable de uso de luces reflectivas, la variable medible que afecta el modelo es la velocidad.

Figura 2-5 Coeficientes resultantes del modelo logit binario y variables para analizar siniestralidad de ciclistas en Bogotá



Fuente: Neira Medina (2015)

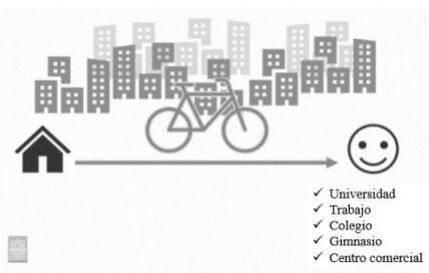
Finalmente, para esta investigación, la construcción de variables de seguridad vial fue realizada a partir de la distancia recorrida en bicicleta (km de ruta) generada con las rutas de

los viajes trazadas en registros GPS de la aplicación Biko y su nivel de exposición a los siniestros georreferenciados, así como un enfoque en la variable velocidad y se tuvieron en cuenta las variables de infraestructura como complemento.

2.4 Ciclo-infraestructura

Desde 1999 y hasta junio de 2021 existen más de 200 manuales de ciclo-infraestructura en el mundo, con diferentes escalas de análisis: local, regional, nacional e internacional (Liu, Hahn y Liu, 2021). Uno de los más consultados, el manual de diseño de bicicletas (CROW, 2016) de la plataforma tecnológica para el transporte, la infraestructura y el espacio público de Países Bajos, indica cinco principios de diseño para la infraestructura de bicicletas: *Cohesión*, *Directness*, *Seguridad*, *Comodidad* y *Atractiveness*. La principal ventaja de los principios de diseño es que pueden aplicarse en cualquier lugar y para todo tipo de ciclista, además, promueven una infraestructura para bicicletas segura y exitosa (Gorris, 2016). La Tabla 2-6 presenta la descripción de los principios mencionados.

Tabla 2-6 Cinco principios de diseño de ciclo-infraestructura según CROW

Principio	Condiciones a evitar	Condiciones recomendadas	Esquema de referencia traducido de CROW
Cohesión: conectando orígenes y destinos para cualquiera y donde sea	Ciclo-infraestructura sin conexión o sin opciones de intercambio modal	Inicia con un segmento, pero siempre que haga parte de una red	 <ul style="list-style-type: none"> ✓ Universidad ✓ Trabajo ✓ Colegio ✓ Gimnasio ✓ Centro comercial
Directness: creando rutas rápidas y cortas, evitando desvíos	Desperdiciar energía en desvíos, ya que la bicicleta es propulsada por humanos.	Conexiones rápidas para minimizar los retrasos y que la bicicleta sea un medio de transporte competitivo.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ✓ Rápida ✓ Menos esfuerzo físico ✓ Alternativa competitiva  <ul style="list-style-type: none"> ✗ - Lenta - Más esfuerzo físico - No competitiva 

Principio	Condiciones a evitar	Condiciones recomendadas	Esquema de referencia traducido de CROW				
<p>Seguridad: promoviendo seguridad vial y salud personal</p>	<p>Diferencias de velocidad y masa de los vehículos para reducir el estrés y la exposición a contaminantes</p>	<p>Crear flujos de tráfico homogéneos</p>					
<p>Comodidad: el instinto humano busca la comodidad. Aun así, es posible que los ingenieros y los desarrolladores de infraestructura no consideren este principio de diseño esencial con tanto cuidado como deberían.</p>	<p>Minimizar las paradas y las molestias, por ejemplo: las diferencias de texturas o vibraciones en la vía</p>	<p>Promover el uso de la bicicleta iniciando con la comodidad de la experiencia, puede ser en vías calmadas y con vegetación</p>	<pre> graph TD A[Principio de <i>comfort</i>] --> B[Experiencia agradable en bicicleta] B --> C[Objetivos de política pública de la bicicleta] </pre>				
<p>Atractiveness: hacer más atractiva la infraestructura implica conocer las preferencias de los ciclistas, sin embargo, hay mínimos.</p>	<p>Construir infraestructura cercana a la congestión</p>	<p>Incluir el mantenimiento y promover las zonas con vegetación e iluminación</p>	<table border="0"> <thead> <tr> <th>Atractivo</th> <th>Poco atractivo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Con vegetación ✓ Abierta ✓ Con mantenimiento ✓ Vías tranquilas </td> <td> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Con tráfico ✓ Congestión ✓ Industria ✓ Oscura/apagada </td> </tr> </tbody> </table>	Atractivo	Poco atractivo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Con vegetación ✓ Abierta ✓ Con mantenimiento ✓ Vías tranquilas 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Con tráfico ✓ Congestión ✓ Industria ✓ Oscura/apagada
Atractivo	Poco atractivo						
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Con vegetación ✓ Abierta ✓ Con mantenimiento ✓ Vías tranquilas 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Con tráfico ✓ Congestión ✓ Industria ✓ Oscura/apagada 						

Fuente: Elaboración propia a partir de CROW (2016)

Así mismo, en Estados Unidos, la NACTO (National Association of City Transportation Officials) genera manuales y guías para parametrizar la infraestructura del espacio público, entre ellos la ciclo-infraestructura (NACTO, 2014) como lo indica la Figura 2-6 en cuatro grupos: ciclo bandas, bici carriles, intersecciones y señalización.

Figura 2-6 Tipo de ciclo-infraestructura según NACTO



Fuente: Elaboración propia a partir de NACTO (2014)

En Colombia, el documento referente es la guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas, creada para aclarar conceptos y unificar el lenguaje técnico con la terminología en relación con la ciclo-infraestructura para que las ciudades de Colombia puedan seguir un vocabulario común (Ministerio de Transporte de Colombia, 2016). Esta guía reconoce que la ciclo-infraestructura puede clasificarse en dos grupos: vías ciclistas y vías ciclo adaptadas como se presenta en la Figura 2-7.

Figura 2-7 Tipo de ciclo-infraestructura según Ministerio de Transporte de Colombia



Fuente: Elaboración propia a partir de Ministerio de Transporte de Colombia (2016) y fotografías desde www.bogota.gov.co (2017-2019)

Igualmente, la ciudad de Bogotá tiene como documento vigente el manual del buen ciclista en tercera edición, donde precisa que la ciclorruta corresponde a: “la vía, sección de la calzada o de andén usada para la circulación exclusiva de la bici. Existen diferentes tipos de ciclorruta” (Secretaría Distrital de Movilidad, 2020). Así mismo, incluye dos tipos de ciclo-infraestructura como el ciclopunte y el ciclotúnel, y se representan sin agrupaciones como lo evidencia la Figura 2-8.

Figura 2-8 Tipo de ciclo-infraestructura según Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá



Fuente: Elaboración propia a partir de Secretaría Distrital de Movilidad (2020)

En complemento, la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá también precisa la ciclo-
infraestructura según el tipo de demarcación por segregación y por sentido de circulación de
ciclistas, como se evidencia en la Figura 2-9.

**Figura 2-9 Tipo de demarcación de ciclo-infraestructura según la Secretaría Distrital
de Movilidad**



Fuente: Elaboración propia a partir de Secretaría Distrital de Movilidad (2020)

Finalmente, de acuerdo con lo anterior, para esta investigación se tiene en cuenta la ciclo-
infraestructura de Bogotá georreferenciada a febrero del año 2018; ya que los viajes de los
ciclistas de la aplicación Biko corresponden a este periodo. Además, el alcance es limitado
a presencia o no de ciclo-infraestructura exclusiva para ciclistas. Se sugiere que para futuras
investigaciones se plantee la desagregación según tipo de ciclo-infraestructura, señalización
para ciclistas, intervenciones para ciclistas en intersecciones viales y ciclo-parqueaderos.

2.5 Estudio del uso de la bicicleta mediante análisis estadístico multivariado

El análisis univariado explora cada variable independientemente, usualmente mediante
estadística descriptiva, mientras que el análisis multivariado identifica la relación y tipo de
dependencia entre las variables analizadas. A continuación, se precisa el contexto teórico
del análisis multivariado:

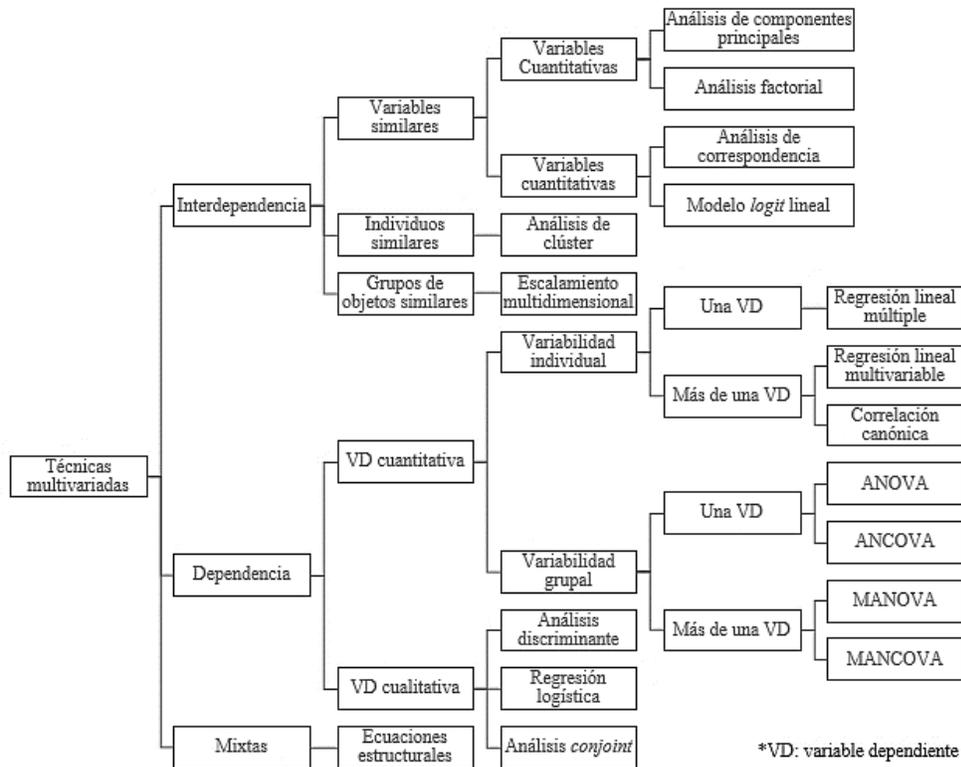
“Kendall (1975) interpreta el análisis multivariado como el conjunto de técnicas
estadísticas que analizan simultáneamente más de dos variables. Con esta definición,

cualquier técnica estadística para el estudio de asociaciones y relaciones puede considerarse una técnica de análisis multivariado. Seber (1984) se refiere al análisis multivariado como aquel orientado al estudio de vectores de variables aleatorias correlacionadas. Para Johnson y Wichern (1998) es una bolsa mixta que contiene métodos apropiados para investigaciones científicas y tecnológicas donde los objetivos son uno o varios de los siguientes:

1. Reducción de dimensión o simplificación estructural. El fenómeno en estudio involucra numerosas variables, para facilitar su interpretación se desea representarlo tan simple como sea posible sin sacrificar información valiosa.
2. Agrupamiento y Clasificación. Se desea crear, a partir de las características medidas, grupos de objetos o variables “similares”. Alternativamente, se puede requerir el establecimiento de reglas para clasificar objetos en grupos bien definidos.
3. Investigación de la dependencia entre variables. La naturaleza de la correlación entre varias variables es de interés. Son todas las variables mutuamente dependientes, ¿cómo dependen?
4. Predicción. La relación entre variables debe ser determinada para predecir los valores de una o más variables sobre la base de observaciones sobre las otras
5. Construcción y Prueba de Hipótesis. Se prueban hipótesis estadísticas específicas, formuladas en término de los parámetros de distribuciones multivariadas.” (Balzarini, Bruno, Córdoba y Teich, 2015)

De acuerdo con lo anterior, el análisis estadístico multivariado tiene varias opciones de métodos, por tanto, la Figura 2-10 muestra algunas opciones según tipo de variables y el tipo de relación existente entre ellas de acuerdo con su dependencia o independencia (Sagaró y Zamora, 2020).

Figura 2-10 Métodos de análisis multivariados según relación y tipo de variable



Fuente: Sagaró y Zamora (2020)

En complemento, el análisis estadístico univariado para viajes en bicicleta, o ciclistas, se ha usado para tener un contexto de los datos generados y el orden de magnitud de las variables mediante estadística descriptiva:

- En Shanghái, China, la caracterización de los viajes del sistema de bicicletas compartidas fue realizado mediante histogramas de frecuencia de cada una de las 3 variables: hora de inicio de viaje, longitud de la trayectoria y duración del viaje (Zhang, Lin y Xiaoyue Cathy, 2019).
- En un estudio comparativo entre Delft, Países Bajos y Atlanta, Estados Unidos, se realizaron encuestas antes y durante el viaje en bicicleta para identificar las actitudes y las características del entorno que generan estrés en los ciclistas, a partir de diagramas de distribución de la respuesta de cada una de las preguntas de la encuesta y el gráfico

de *boxplot* para la comparación entre las dos ciudades respecto a la distribución de la variable velocidad de los viajes registrados (Gadsby, Hagenzieker y Watkins, 2021).

Así mismo, el análisis estadístico multivariado ha permitido identificar relaciones entre las variables y revisiones de causalidad para el uso de la bicicleta o el análisis del comportamiento ciclista:

- En Portland, Estados Unidos, en un estudio realizaron MANOVAs para las variables velocidad, distancia de viaje, tiempo de viaje, desaceleración y aceleración con el fin de comprender las preferencias de los ciclistas por los tipos de infraestructura, a partir de los registros georreferenciados de 1.449 viajes utilitarios y estimar un modelo de elección de ruta en bicicleta. El modelo utilizó un algoritmo de generación de conjuntos de opciones basado en múltiples permutaciones de atributos de ruta y fue formulado para tener en cuenta las alternativas de ruta superpuestas. Los hallazgos sugieren que los ciclistas son sensibles a los efectos de la distancia, la frecuencia de giro, la pendiente, el tipo de control en las intersecciones (por ejemplo, presencia o ausencia de señales de tráfico) y los volúmenes de tráfico (Broach, Dill y Gliebe, 2012).
- En Australia, para las ciudades de Melbourne, Perth, Geelong y Bendigo, se realizó un análisis, desde cuatro modelos estadísticos, para revisar la relación entre la distancia de paso entre ciclistas y otros vehículos y las características de la vía. El primer modelo fue una regresión lineal de efectos fijos de la distancia de paso; incluía variables como el tipo de carril para bicicletas, el tipo de vehículo que pasaba cerca, el límite de velocidad y el número de carriles. El segundo modelo fue una regresión lineal generalizada bayesiana (una especificación *logit*) que modeló la probabilidad de la distancia de paso de menos de 1 m. El tercer modelo fue una regresión lineal de efectos fijos, que modeló la probabilidad de un paso de menos de 1 m con la ventaja sobre el segundo modelo de tener parámetros fáciles de interpretar, pero sus propiedades estadísticas no son tan robustas. El modelo final utilizado fue un modelo de regresión cuantílica; este modelo describe el cambio en el % p de distancia de paso más cercano asociado con diferentes atributos de vías y tráfico, por ejemplo, si $p = 0.1$, la regresión describe cuántos

centímetros cambia el percentil 10 de distancias de paso en diferentes condiciones de la carretera, en promedio (Nolan, Sinclair y Savage, 2021).

También, existen otros estudios donde se realizaron análisis univariado, bivariado y multivariado:

- En Vancouver, Canadá, analizaron cinco años de siniestros de ciclistas y peatones en las 134 zonas de análisis de tráfico (TAZ por sus siglas en inglés) para establecer modelos de siniestralidad. Los datos del SIG incluyeron indicadores de uso del suelo, entorno construido, socioeconómico, red de bicicletas y red peatonal. Se desarrollaron modelos multivariados bayesianos, con y sin efectos espaciales, y fueron comparados con los modelos univariados correspondientes a partir de las variables km recorrido, densidad de señalización, longitud de viaje y pendiente de la zona (Osama y Sayed, 2017).
- En Bogotá, Colombia, a partir de las encuestas de movilidad 2005, 2011 y 2015 un estudio realizó un análisis bivariado comparando las personas que viajan en bicicleta con las que no viajan diariamente (según el viaje más reciente informado en la encuesta de viajes) de acuerdo con sus factores sociodemográficos, comunitarios, ambientales construidos en el origen, durante la ruta y el destino. Posteriormente, el análisis generó Modelos Aditivos Generalizados (GAM es una extensión flexible de los modelos lineales generalizados que modelan relaciones no lineales al no imponer relaciones monótonas entre los predictores y la variable dependiente) multivariados para evaluar las características asociadas a los desplazamientos en bicicleta con enfoque de género (Higuera-Mendieta, y otros, 2021).

Finalmente, la presente investigación es resuelta desde un problema multivariado para analizar la decisión de ruta de ciclistas; sin embargo, la estadística descriptiva fue la herramienta inicial para tener el contexto de cada una de las variables creadas y las condiciones para elegir el método de análisis multivariado. Por tanto, en los siguientes numerales se profundiza en dos métodos de análisis multivariado que permitieron el tratamiento estadístico de los registros de la aplicación móvil Biko, como complemento del

numeral 2.1. junto con las variables creadas desde fuentes oficiales de bases de datos geográficas según ciclo infraestructura y seguridad vial.

2.6 Análisis de clúster para el uso de la bicicleta

“El análisis de clúster es un conjunto de herramientas para crear grupos (conglomerados) a partir de datos multivariados. La técnica tiene como objetivo construir grupos con propiedades homogéneas a partir de muestras grandes heterogéneas. Cada grupo o conglomerado debe ser lo más homogéneo posible y las diferencias entre los distintos grupos deben ser lo más grandes posible (Johnson y Wichern, 2007). El análisis de conglomerados se puede dividir en dos pasos fundamentales:

- (i) elección de una medida de proximidad entre los elementos a clasificar
- (ii) elección del algoritmo de construcción de conglomerados.

Con base en esta doble elección, se forman grupos, que se pretende que sean homogéneos (los elementos de un mismo clúster son similares) y bien separados (los elementos de diferentes clústeres son bastante distintos). Existen dos tipos de métodos de clúster: métodos jerárquicos y algoritmos de partición, los métodos jerárquicos se pueden dividir en procedimientos de aglomeración y divisibles:

- **Los métodos jerárquicos de aglomeración** basados en la partición más fina posible (cada observación forma un conglomerado) que se agrupará sucesivamente.
- **Los métodos jerárquicos divisibles o de división** comienzan con un solo grupo, que contiene todas las observaciones; continúa, en cada paso, dividiendo este grupo en dos grupos de menor tamaño. Los métodos jerárquicos de división rara vez se utilizan debido a su complejidad computacional.

Una vez fijado el número de clases de la partición, los algoritmos de partición obtienen una distribución inicial del conjunto a clasificar y proceden intercambiando elementos entre grupos hasta optimizar una determinada puntuación”. Traducido a partir de (Molina-Gómez, Viana da Fonseca, Ferreira, Sousa y Bulla-Cruz, 2021).

Por tanto, a continuación, el análisis de clúster es revisado desde algunos estudios de caso para el uso de la bicicleta o el comportamiento de ciclistas:

- En la ciudad de Edmonton, Canadá, un estudio realizó una encuesta con vídeos de viajes en bicicleta para revisar la caracterización cualitativa de cuatro tipos de ciclistas usada en la ciudad de Portland y con las variables construidas proponer una alternativa cuantitativa para esta clasificación. El análisis de clúster fue el método principal utilizado a partir de la función *tuneclus* en el paquete “*clustrd*” del programa RStudio, que evalúa el ancho de *Silhouette* promedio, donde los valores más altos indican una mejor separación y clústeres más compactos (Cabral y Kim, 2020).
- En Carolina del Norte, Estados Unidos, el análisis de clúster de clases latentes (CLL), en el programa SAS fue utilizado a partir de los registros de siniestros en bicicleta recopilados desde el año 2007 hasta 2014, para identificar en cuáles patrones debería enfocarse la política pública sobre siniestralidad. En específico, para identificar el número apropiado de clústeres usaron los criterios de: Criterio de información de Akaike (AIC), el Criterio de información bayesiano (BIC), el Criterio de información consistente de Akaike (CAIC) y las medidas basadas en entropía, ya que los valores mínimos de AIC, BIC, CAIC indican el mejor número de clústeres (Lin y Wei, 2021).
- Un estudio en seis países europeos (Reino Unido, Países Bajos, Suecia, Hungría, Italia y España) usó análisis de clúster para identificar patrones de características demográficas y actitudes a partir de una encuesta virtual a ciclistas. Para esto, los autores usaron el programa SPSS a partir del logaritmo de verosimilitud como la medida de la distancia entre los clústeres y el criterio de información bayesiano (BIC). También, revisaron el coeficiente de *Silhouette*, que compara el promedio de la cohesión del grupo con la separación promedio entre grupos, y evaluar la bondad de ajuste del clúster (Fraboni, Prati, Casu, de Angelis y Pietrantonio, 2021).

Finalmente, para esta investigación, el análisis de clúster fue fundamental para inicialmente revisar patrones de la base de datos cuantitativa resultante de las rutas con registro geográfico en Biko y, posteriormente, en la creación de categorías para cada una de las variables y el número de clústeres óptimo para cada variable de acuerdo con los diagramas de coeficiente de *Silhouette* mediante el uso del programa RStudio y con la base de datos, dispuesta en variables categóricas, poder realizar Análisis de Correspondencias Múltiples.

2.7 Análisis de Correspondencias Múltiples (MCA)

“El Análisis de Correspondencias Múltiples es un método de estudio de datos que se utiliza para describir, explorar, resumir y visualizar información contenida en una tabla de datos de N registros/individuos descritos por Q variables categóricas. Los principales objetivos de MCA se pueden definir de la siguiente manera:

- (1) proporcionar una tipología de los individuos, es decir, estudiar las similitudes entre los individuos desde una perspectiva multidimensional
- (2) evaluar la relación entre las variables y estudiar las asociaciones entre las categorías
- (3) vincular el estudio de los individuos y el de las variables para caracterizar a los individuos utilizando las variables”. Traducido a partir de (Blasius y Greenacre, 2014).

Por tanto, “MCA codifica datos mediante la creación de varias columnas binarias para cada variable con la restricción de que solo una de las columnas obtiene el valor 1. Este esquema de codificación crea dimensiones adicionales artificiales porque una variable categórica está codificada con varias columnas. Como consecuencia, la inercia (es decir, la varianza) del espacio de la solución se exagera artificialmente y el porcentaje de la inercia explicada por la primera dimensión se subestima. Por tanto, a menudo se utilizan fórmulas de corrección, entre ellas la de Benzécri (1979) y la Greenacre (1993)”. Traducido a partir de (Abdi y Valentin, 2015).

La Tabla 2-7 indica los valores propios como λ y proporciones de inercia como τ para los tipos de correcciones, y precisa que los valores propios de la matriz de Burt son iguales a los valores propios al cuadrado de la matriz del indicador; los valores propios corregidos para Benzécri y Greenacre son los mismos, pero la proporción de varianza difiere.

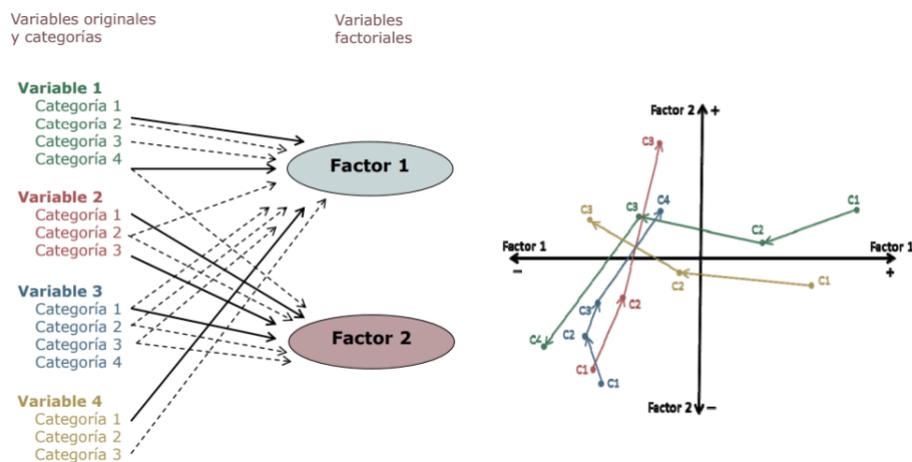
Tabla 2-7 Valores propios y proporciones de inercia para los tipos de correcciones de MCA

Factor /dimensión	Matriz indicador		Matriz de Burt		Corrección Benzécri		Corrección de Greenacre	
	λ	τ	λ	τ	λ	τ	λ	τ
1	0,8532	0,7110	0,7280	0,9306	0,7004	0,9823	0,7004	0,5837
2	0,2000	0,1667	0,4000	0,0511	0,0123	0,0173	0,0123	0,0103
3	0,1151	0,0959	0,0133	0,0169	0,0003	0,0004	0,0003	0,0002
4	0,3170	0,0264	0,0010	0,0013	0	0	0	0

Fuente: Traducido a partir de Abdi y Valentin, (2015)

Adicionalmente, el Análisis de Correspondencias y sus variantes tienen una herramienta de visualización conocida como mapa de correspondencias; esta representación gráfica es una ayuda a la interpretación ya que la proximidad en el espacio significa “correlación” entre categorías: correspondencia directa (positivo) e inversa (negativo) de acuerdo con los ejes, factores o dimensiones (Fachelli y López-Roldán, 2015), tal como se representa en la Figura 2-11.

Figura 2-11 mapa de correspondencias

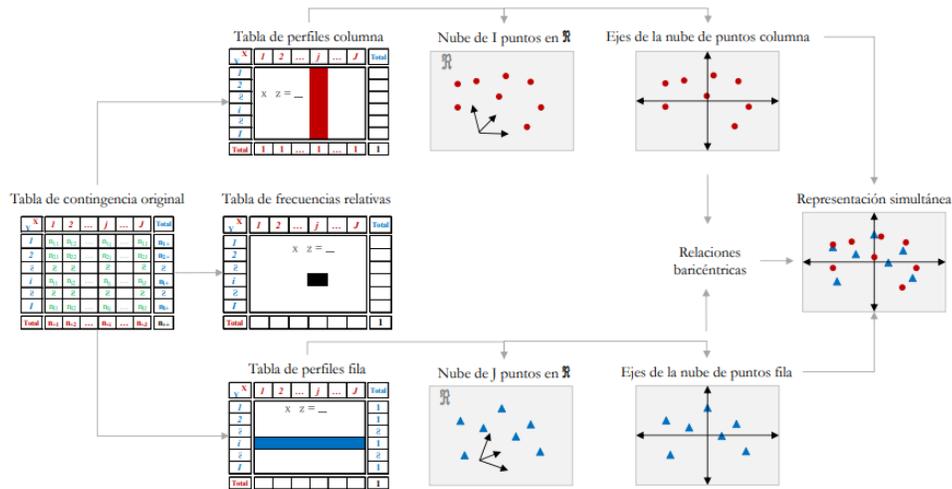


Fuente: Fachelli y López-Roldán, (2015)

Sin embargo, para múltiples datos y variables, el proceso implica apoyarse en *software*, por tanto, es fundamental comprender que durante el proceso el software crea la tabla de contingencia a partir de la base de datos original donde para cada columna se definen las

categorías de cada registro y a partir de estas, se genera el mapa de correspondencias como se presenta en la Figura 2-12.

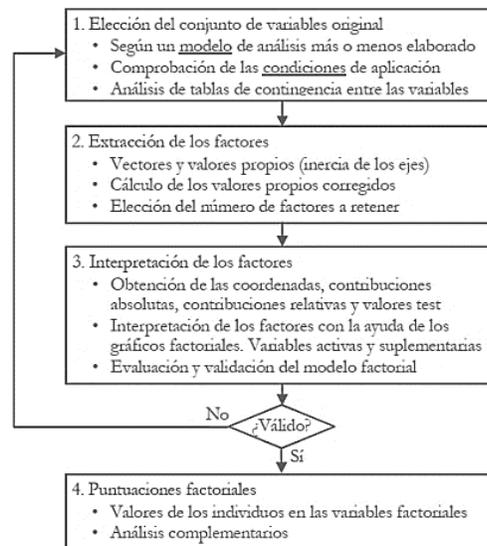
Figura 2-12 Transformación de tabla de contingencia para mapa de correspondencia



Fuente: Fachelli y López-Roldán (2015)

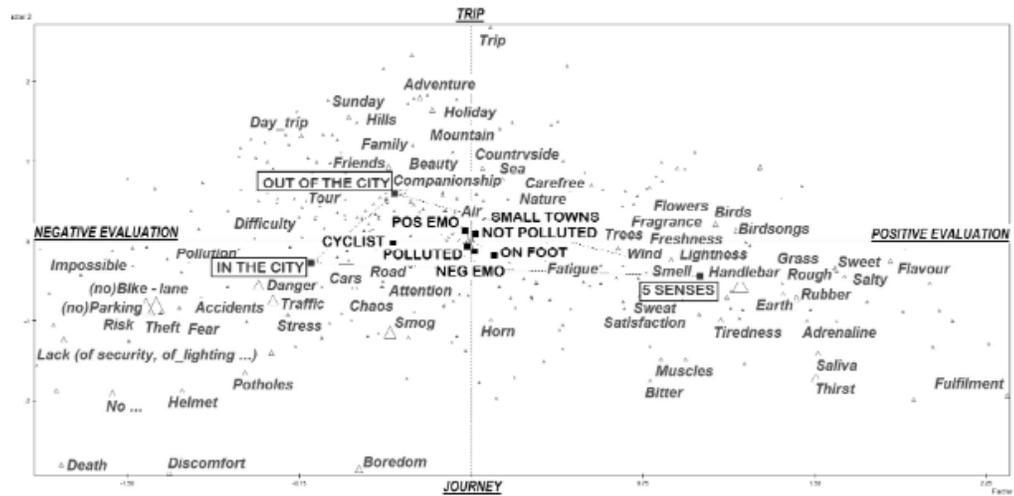
Por lo anterior, el método de MCA se resume en la Figura 2-13

Figura 2-13 Método de MCA



Fuente: Fachelli y López-Roldán (2015)

Figura 2-15 MCA sobre factores de viaje de ciclistas, estudio de caso Roma, Italia



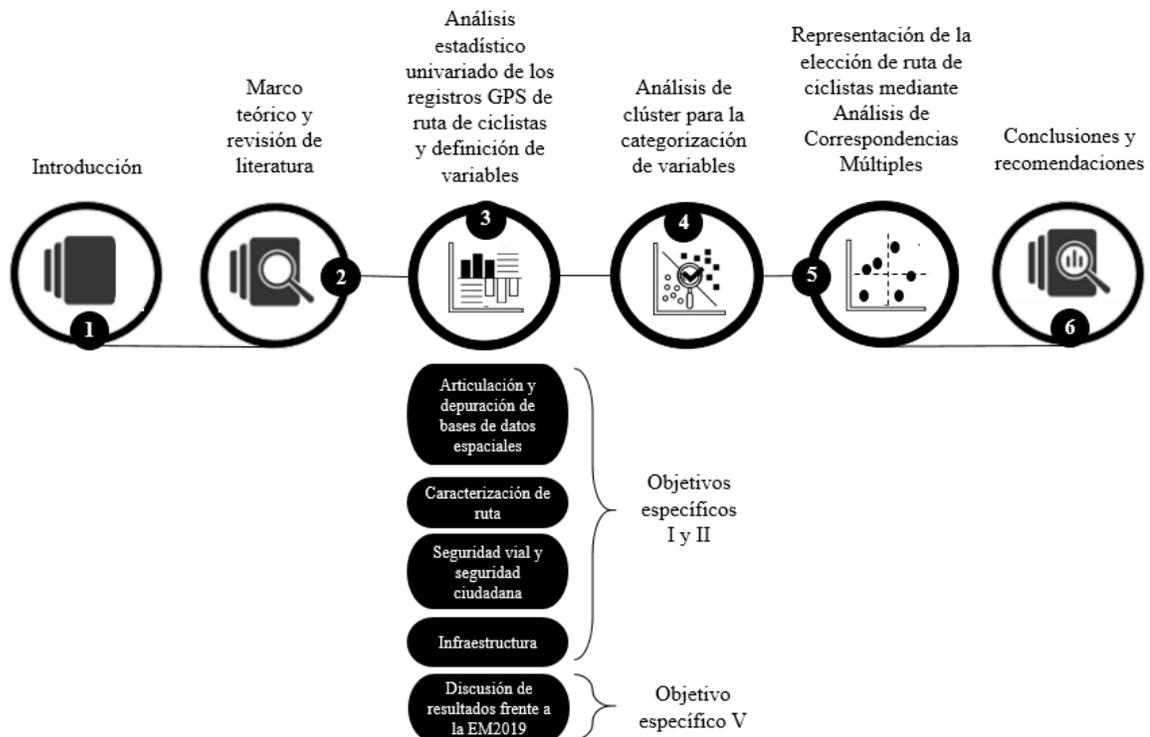
Fuente: Sarrica, Alecci, Passafaro, Rimano y Mazzara, (2019)

Finalmente, en esta investigación, el método de MCA fue usado para identificar las relaciones entre las variables categóricas creadas para comprender la decisión de ruta de los ciclistas en Bogotá; así mismo, el software Stata fue utilizado para generar los mapas de correspondencia a partir de la creación de la tabla de contingencia y el ajuste por matriz de Burt.

3 Análisis estadístico univariado de los registros GPS de ruta de ciclistas y definición de variables

A partir del marco teórico y revisión de literatura, cinco secciones conforman el análisis estadístico univariado para la definición de variables en este capítulo: 3.1. articulación y depuración de bases de datos espaciales, 3.2. caracterización de ruta, 3.3. seguridad vial y seguridad ciudadana, 3.4. infraestructura y 3.5 discusión de resultados frente a la Encuesta de Movilidad 2019. Las primeras cuatro secciones implican el desarrollo de los objetivos específicos I y II precisados en la sección 1.4.2, mientras que la quinta corresponde al análisis planteado para desarrollar el objetivo específico V. Por lo tanto, este capítulo expone cinco secciones y en cada una precisa los resultados obtenidos y el análisis correspondiente tal como lo resume la Figura 3-1.

Figura 3-1 Diagrama resumen del capítulo 3



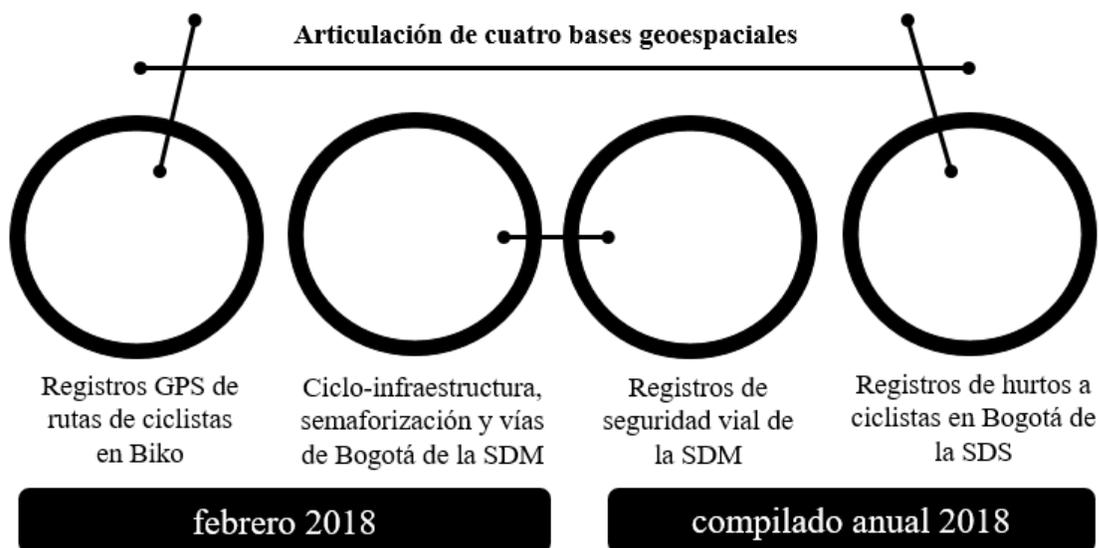
3.1 Articulación y depuración de bases de datos espaciales

La base de datos geográfica e inicial para esta investigación fue construida a partir de un proceso de articulación de diferentes fuentes y registros georreferenciados como se evidencia en la Figura 3-2, donde el periodo de estudio se definió según los registros de ruta disponibles de la aplicación móvil Biko (desde el 1 de febrero de 2018 al 28 de febrero de 2018), este período de análisis debido a las condiciones de acceso de la información acordadas con Biko en el marco de *habeas data*.

Sin embargo, aunque los registros GPS de ruta eran de un mes, se eligió febrero ya que incluía el día sin carro, es considerado un mes típico, y con el fin de analizar un escenario crítico anual, las bases de datos geográficas para analizar seguridad vial y seguridad ciudadana fueron seleccionadas con periodo de estudio del año 2018.

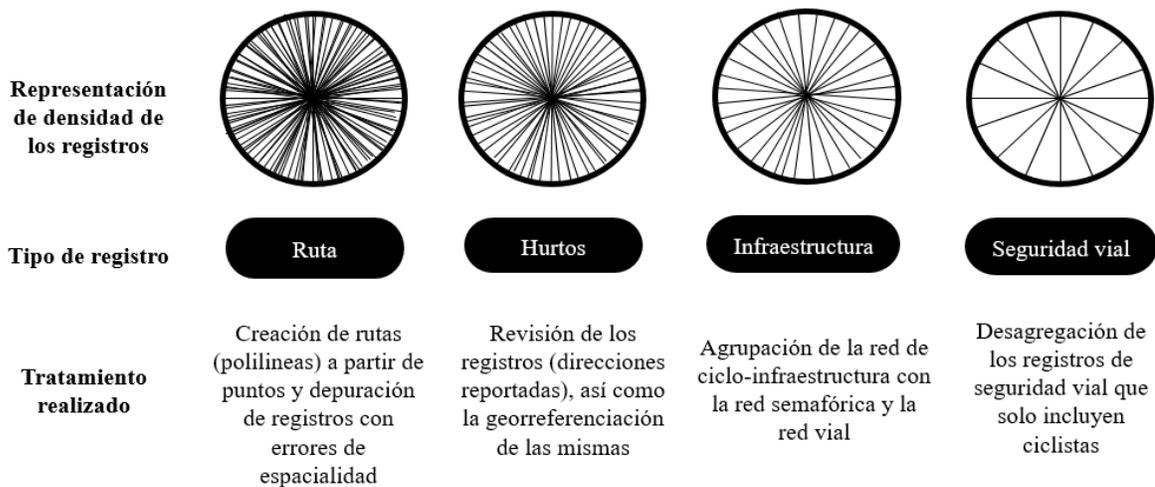
Adicionalmente, para revisar la representatividad y de discusión de resultados se realiza una comparación de variables y de análisis geográfico frente a la Encuesta de Movilidad 2019 de Bogotá en la sección 3.5.

Figura 3-2 Origen y periodo para base de datos



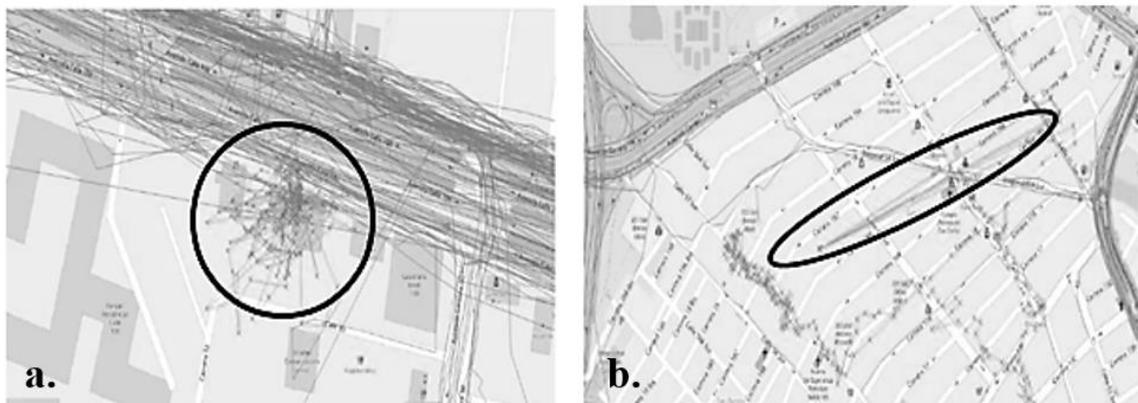
Una vez identificado el periodo de análisis y la fuente de los registros, cada una de las bases de datos tuvo un tratamiento de depuración de acuerdo con el tipo de registro y las condiciones de georreferenciación necesarias para construir una única base de datos. Por tanto, la Figura 3-3 presenta el resumen de la depuración de cada base de datos.

Figura 3-3 Depuración de bases de datos geospaciales



La base de datos con registros tipo “ruta” fue la de mayor tratamiento de las cuatro seleccionadas. Por esto, la Figura 3-4 evidencia dos de los casos de depuración recurrentes: **(a)** múltiples registros de la misma ruta con coordenadas cercanas a menos de 10 metros de diámetro y **(b)** secciones de ruta que atraviesan las áreas geográficas que precisan predios construidos.

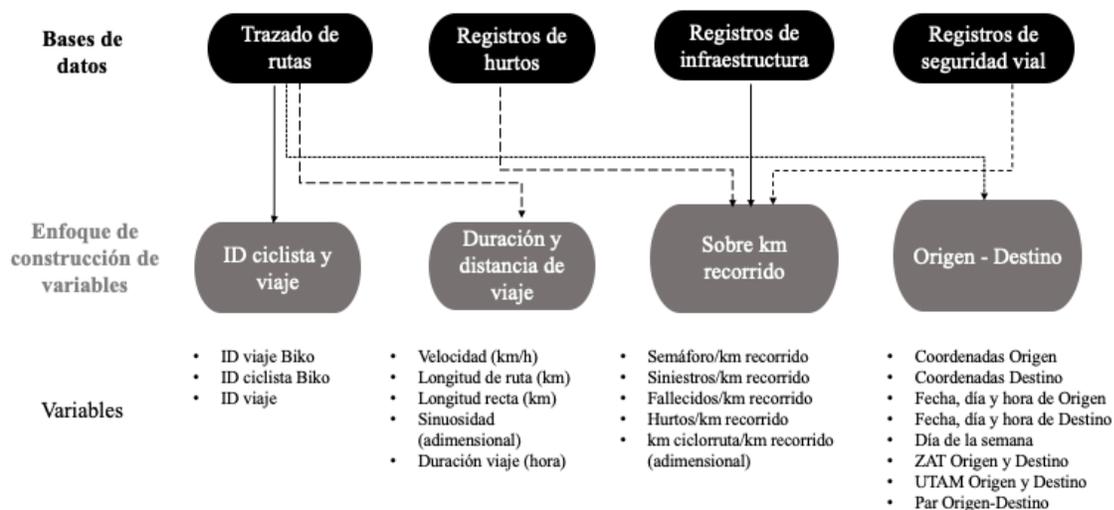
Figura 3-4 Depuración de registros tipo ruta



Así mismo, la base de datos de hurtos de la Secretaría Distrital de Seguridad implicó una revisión continua de cada una de las direcciones con el fin de geocodificar cada registro. Para esto, se usaron dos herramientas: inicialmente, mediante RStudio se depuró el campo “dirección del hurto” para parametrizar las múltiples formas que incluía la base de datos para “calle, carrera y número” y luego se empleó *Google My Maps* para geocodificar o generar registros tipo coordenadas a partir de las direcciones. Por el contrario, las bases de datos de ciclo-infraestructura y siniestralidad solo requirieron el filtro con el enfoque ciclista para su depuración.

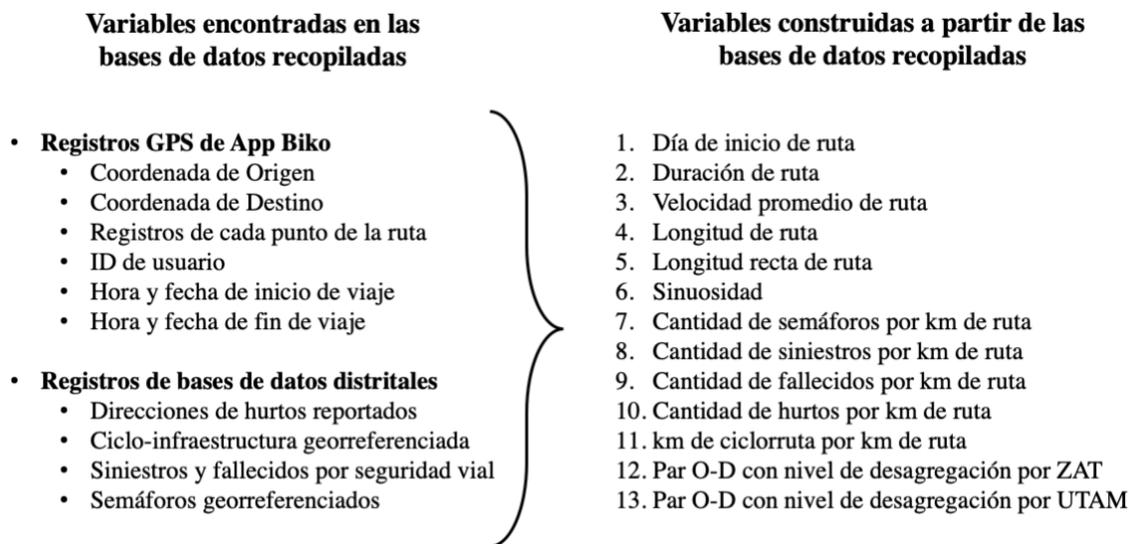
Una vez realizada la depuración de las cuatro bases de datos y con el fin de tener información del viaje, ruta y crear las variables definidas sobre km de ruta recorrida, se generaron los enfoques de creación de variables para cada base de datos como se muestran en la Figura 3-5.

Figura 3-5 Enfoques para la creación de variables a partir de las bases de datos



Estos enfoques pretenden incluir la información mínima de la caracterización del viaje y del ciclista, para la construcción de encuestas de hogares y como insumo adicional de seguridad vial y ciclo-infraestructura propio de esta investigación. Por tanto, en la Figura 3-6 se precisan solo las variables construidas:

Figura 3-6 Listado de variables construidas



Con las variables construidas, se procede a caracterizar cada una a través de estadística descriptiva. Además, se identificó que, al revisar los valores mínimos de cada una de las variables, fue necesario incluir investigaciones que respaldaran las consideraciones mínimas de orden de magnitud y coherencia de cada variable, como se precisa a continuación:

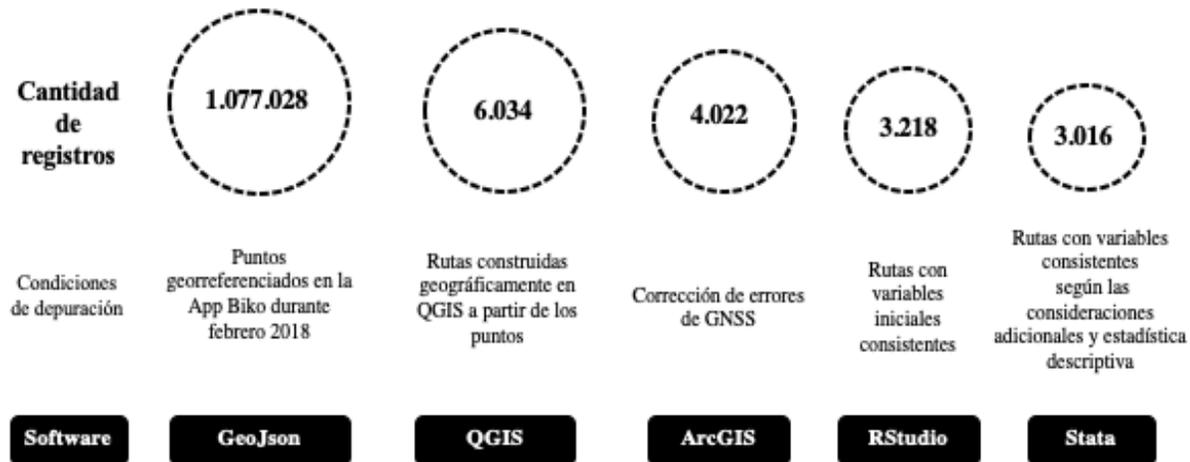
- La velocidad promedio de caminata es de 5 km/h (Stamatakis, 2018). Lo que implica un orden de magnitud mínima en las velocidades en bicicleta. Además, los registros de la aplicación móvil Biko incluyen aquellos cuando el usuario se detiene ya sea por un semáforo o por otra razón como parte integral de la ruta. Sin embargo, para este estudio, el registro debe superar la velocidad a pie de 5,3 km/h.
- La longitud de ruta como mínimo debería corresponder a una calle, cuya distancia en Bogotá es de cerca de 0,100 km, según la base de datos georreferenciada de vías de Bogotá. En efecto, la mínima longitud en los registros a partir de Biko corresponde a 0,171 km. Además, se precisa que, al ser única opción vial a corta distancia, para un análisis de decisión de ruta, una distancia menor implicaría una única ruta y podría sesgar el análisis de decisión de ruta.
- La longitud de ruta en línea recta, o longitud euclidiana, entre las coordenadas de inicio y las coordenadas de fin de ruta puede tener valores cercanos a cero. Esto

ocurre en algunos registros que inician y terminan su ruta en el mismo lugar, lo cual se revisó al tener en la variable longitud de ruta distancias diferentes a cero y en los trazados incluyen coordenadas de inicio y de fin similares. Esto puede explicarse porque hay ciclistas cuyo propósito de viaje es hacer una ruta cíclica o recorrido deportivo.

- Con respecto a la duración de viaje, se revisó que los registros tuvieran valores positivos y mayores a cero, de lo contrario el viaje no habría ocurrido y se debía a un error de registro en la aplicación móvil.

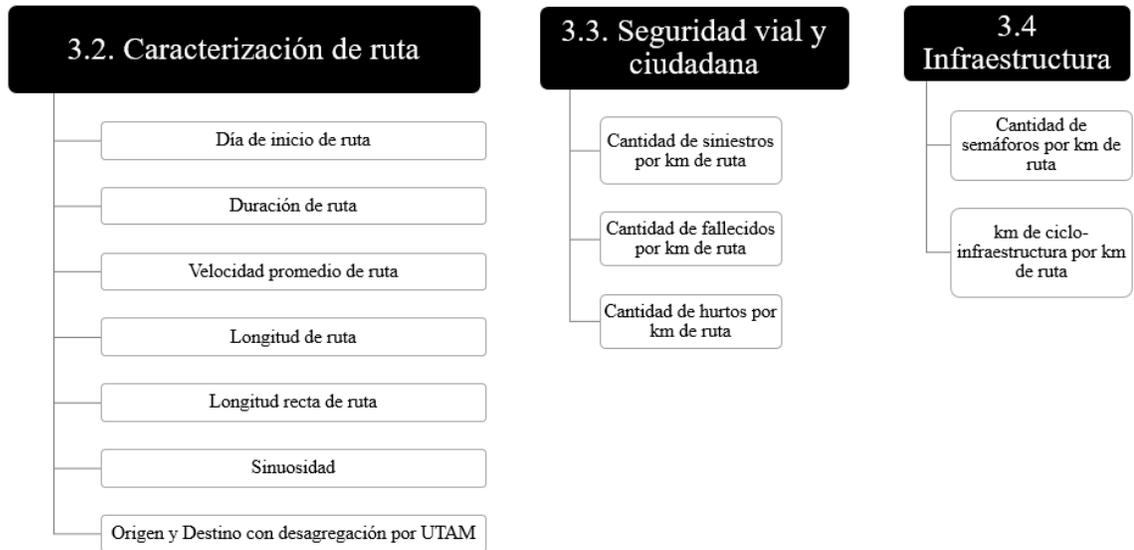
Con las consideraciones mencionadas, la Figura 3-7 resume el flujo del proceso de depuración iterativa de registros para obtener la base de datos de 3.016 rutas con trece variables.

Figura 3-7 Flujo del proceso de depuración iterativa para obtener la base de datos



Finalmente, con la base de datos de 3.016 rutas se procede a la caracterización de cada una de las variables mediante análisis estadístico y geoespacial, discriminadas en tres grupos en los numerales 3.2, 3.3. y 3.4 respectivamente: caracterización de ruta, seguridad vial y ciudadana, e infraestructura, como se muestra en la Figura 3-8.

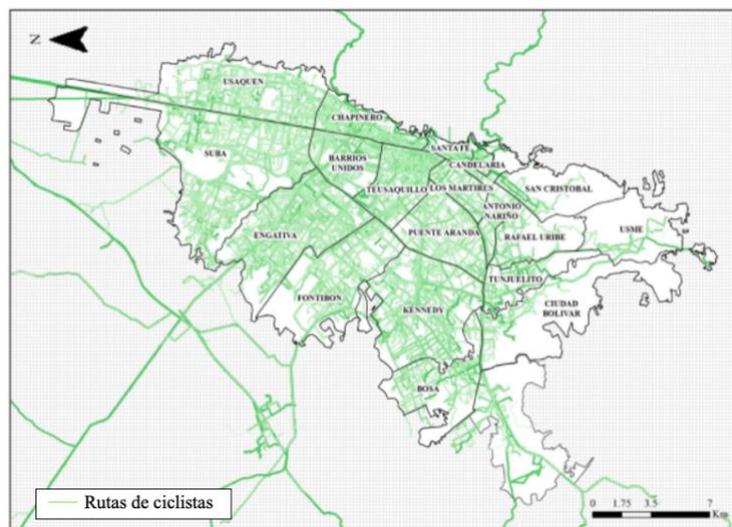
Figura 3-8 Grupos de variables



3.2 Caracterización de ruta

Inicialmente, las 3016 rutas obtenidas del proceso de la sección 3.1 se representan en la Figura 3-9, donde se evidencia que hay cobertura (en verde) de registros en Bogotá, a excepción de la zona rural y montañosa del sur de la ciudad.

Figura 3-9 Mapa de las rutas a caracterizar estadísticamente



En complemento, la estadística descriptiva es usada para caracterizar inicialmente la ruta mediante seis variables, como lo resume la Tabla 3-1, y se detalla desde la sección 3.2.1 hasta la sección 3.2.7. Esta última corresponde a la variable Origen-Destino que se precisa mediante análisis geoespacial.

Tabla 3-1 Resumen estadística descriptiva para variables de caracterización de ruta

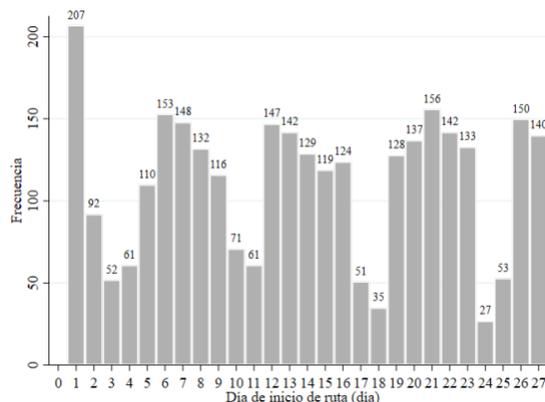
Variable	Unidad de medida	Media	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Día de inicio de ruta	Día	13,84	7,90	1,00	27,00
Duración de ruta	h	0,73	0,56	0,04	7,30
Velocidad promedio de ruta	km/h	14,43	4,46	5,37	48,46
Longitud de ruta	km	10,07	7,38	0,57	108,50
Longitud recta de ruta	km	6,53	4,06	0,00	30,41
Sinuosidad	Adimensional	65,40	1.076,68	0,08	52951,00

Fuente: Elaboración propia mediante Stata

3.2.1 Día de inicio de ruta (día)

Es una variable discreta que se generó a partir de la fecha de inicio de ruta registrada en la app Biko. Esta incluye registros desde el 1 de febrero hasta el 27 de febrero de 2018. El 1 de febrero de 2018 corresponde al primer jueves de febrero de ese año; es decir el “Día de no carro” en Bogotá y, por ende, se puede explicar que sea el día con más registros. Además, la Figura 3-10 indica que los días con menos registros por semana corresponden a los fines de semana.

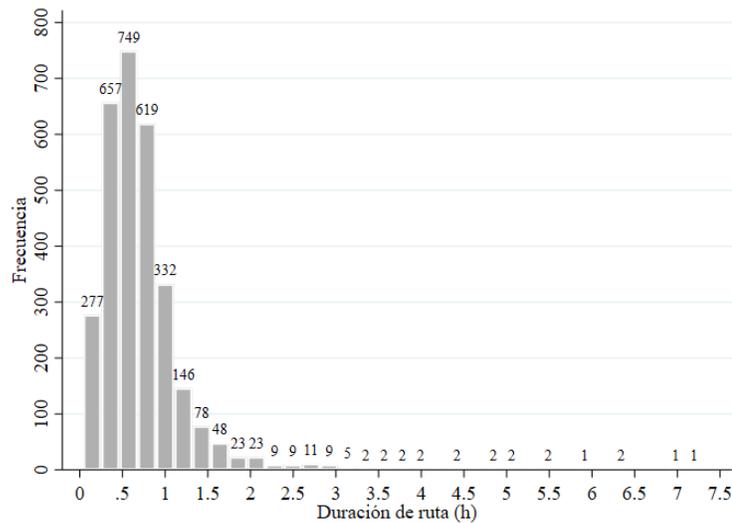
Figura 3-10 Histograma de frecuencia para día de inicio de ruta



3.2.2 Duración de ruta (h)

Es una variable cuantitativa continua que se construyó a partir de los registros GPS de la hora y fecha del punto origen y destino georreferenciado en la app Biko. Para esta variable, durante el proceso se incluyó la fecha, ya que hay registros que inician en la noche de un día y finalizan a la mañana del día siguiente. A continuación, se evidencia que la mayor parte de los registros se concentran en el rango de duración de viaje igual o menor a 1 hora, con una duración máxima cercana a 7 horas, como se muestra en la Figura 3-11.

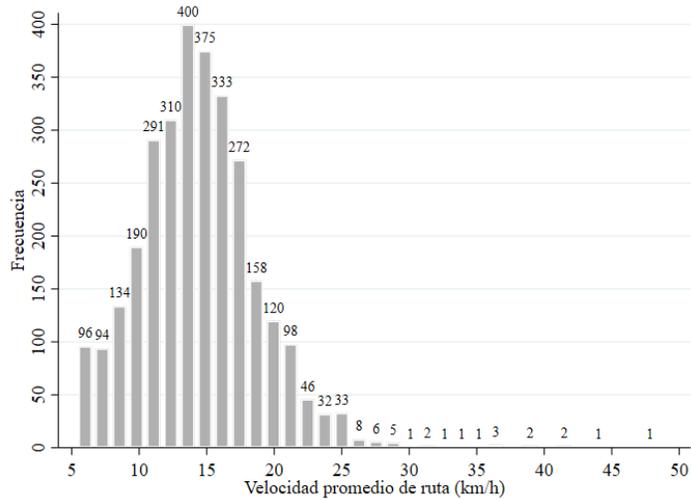
Figura 3-11 Histograma de frecuencia para duración de ruta



3.2.3 Velocidad promedio de ruta (km/h)

Es una variable cuantitativa continua que se construyó a partir de los registros GPS de cada punto de viaje con tiempo y coordenadas. Con la velocidad de cada punto, se generó una velocidad promedio por ruta. Finalmente, se encontró que la séptima parte (401 respecto a los 3016) de los viajes registrados presentan velocidad promedio de viaje entre 14 y 15 km/h, con registros de velocidad de mínimo 5,3 km/h y máximo hasta 48 km/h, como se representa en la Figura 3-12.

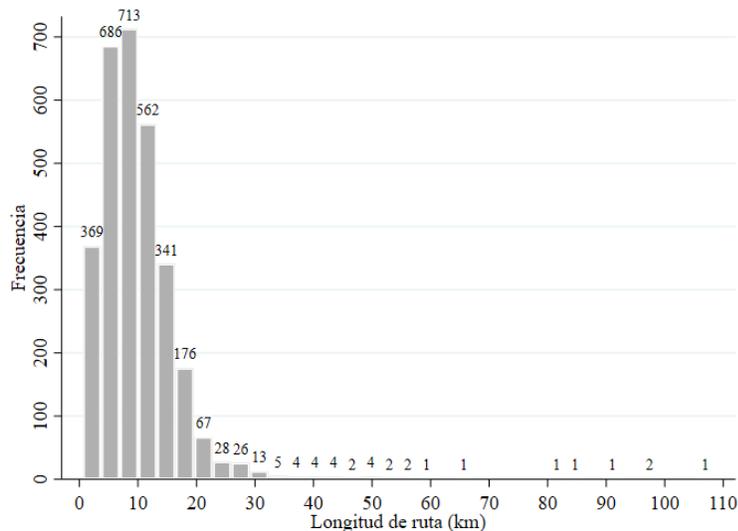
Figura 3-12 Histograma de frecuencia para velocidad promedio de ruta



3.2.4 Longitud de ruta (km)

Es una variable cuantitativa continua que se construyó a partir de los registros GPS de cada punto de ruta con coordenadas y dimensionamiento geográfico al generar el conjunto de puntos como ruta. Se evidencia en la Figura 3-13 que la mayor parte de los registros se concentran en el rango de longitud de ruta entre 8 km y 20 km, con un registro máximo superior a 100 km.

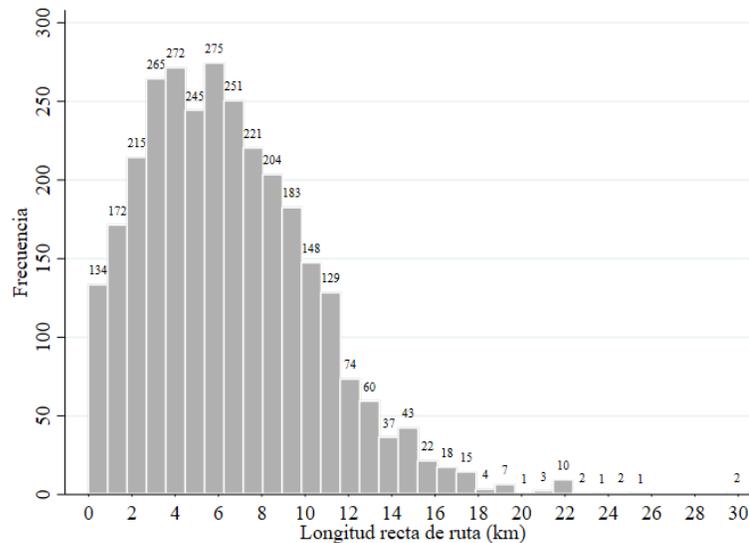
Figura 3-13 Histograma de frecuencia para longitud de ruta



3.2.5 Longitud recta de ruta (km)

Es una variable cuantitativa continua que se construyó a partir de los registros GPS de cada punto de ruta de origen y destino, por dos razones: para ser un insumo de la variable sinuosidad y para identificar cuántas rutas eran cíclicas, es decir, con origen y destino cercano. Se evidencia en la Figura 3-14 que la mayor parte de los registros se concentran en el rango de longitud de ruta recta entre 1 km y 12 km, con dos registros máximos de 30 km.

Figura 3-14 Histograma de frecuencia para longitud de ruta recta



3.2.6 Sinuosidad (adimensional)

Es una variable cuantitativa continua que se generó para reconocer qué tan diferente es el trazado de ruta del ciclista con respecto a una línea recta, la cual se calculó según la ecuación 3.1:

$$\text{Sinuosidad (adimensional)} = \frac{\text{Longitud de ruta recorrido GPS (km)}}{\text{Longitud de línea recta entre coordenadas de Origen y Destino(km)}} \quad (3.1)$$

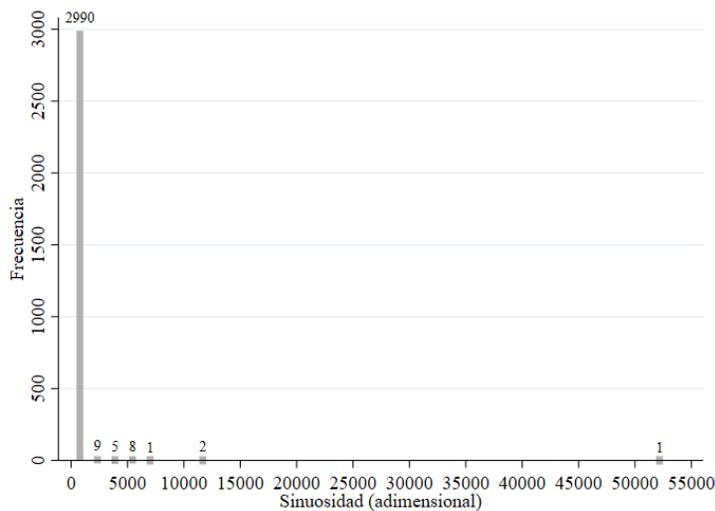
Adicionalmente, se encontraron 26 datos atípicos superiores a 1000. Esto resultó debido a que el denominador de la fórmula (la longitud de la línea recta entre coordenadas Origen – Destino) era cercano a 0, es decir, el ciclista inició y finalizó la ruta en el mismo punto,

también llamada ruta cíclica en esta investigación. Este fenómeno ocurrió en el registro más atípico encontrado, que se presenta en la ecuación 3.2:

$$\text{Sinusidad caso más atípico registrado (adimensional)} = \frac{53 \text{ (km)}}{0,001 \text{ (km)}} = 53000 \quad (3.2)$$

Por tanto, para la sinuosidad, entre más cercano a 1 sea su valor, el trazado de la ruta corresponde a una línea recta. Si tiene valores superiores a 1, el trazado de la ruta es más sinuoso, como se representa en la Figura 3-15.

Figura 3-15 Histograma de frecuencia para sinuosidad



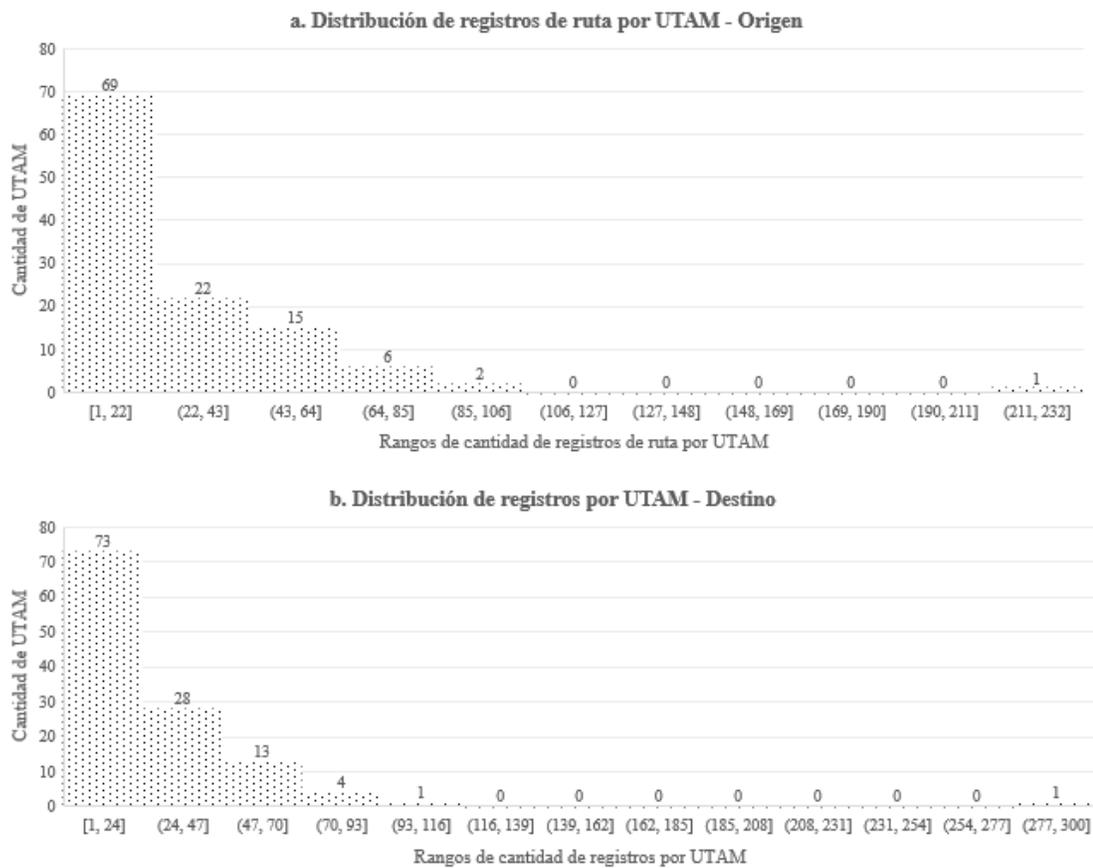
3.2.7 Origen y Destino con desagregación por UTAM

Una UTAM es “la Unidad Territorial de Análisis de Movilidad que está conformada por uno o varios barrios, tanto en suelo urbano como en suelo de expansión, que mantienen condiciones de uso del suelo y socioeconómicas homogéneas” (Unión Temporal Steer-CNC, 2021). Además, es una de las formas de desagregar la política pública de movilidad en la EM2019. Sin embargo, existe otro tipo de desagregación por ZAT, la cual se define como una “Zona de Análisis de Transporte, y corresponde a áreas homogéneas en uso del suelo y estrato socioeconómico” (Unión Temporal Steer-CNC, 2021) para la ciudad de Bogotá.

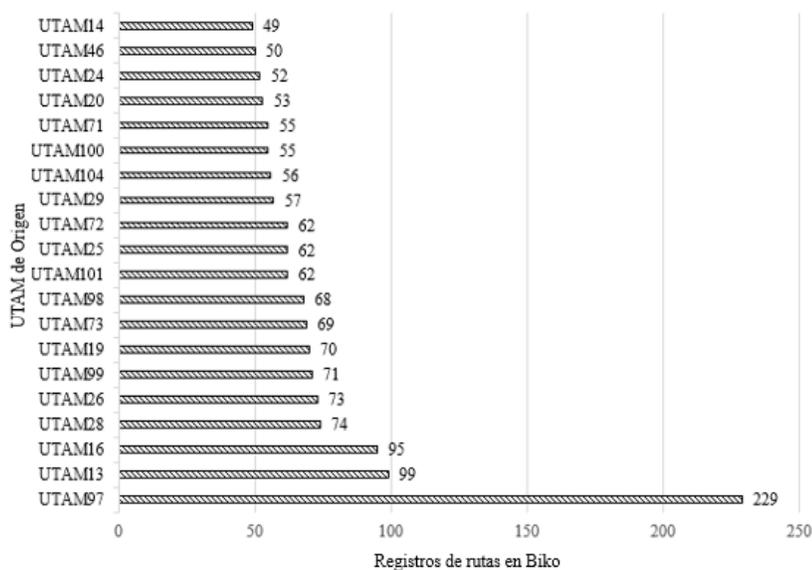
En este análisis el nivel de desagregación utilizado es por UTAM, ya que tiene similitud con las áreas denominadas Unidades de Planeamiento Zonal – UPZ. Para la construcción de esta

variable, a cada ruta georreferenciada se le asoció espacialmente el área de Origen y Destino desagregada por UTAM y caracterizada de acuerdo con la metodología de la EM2019 (Unión Temporal - CNC, 2019). Por tanto, en la Figura 3-16 se presenta la distribución general de registros por UTAM.

Figura 3-16 Distribución general de registros por UTAM



De acuerdo con la Figura 3-16, donde 69 UTAM de Origen tienen entre 1 y 22 rutas, y 73 UTAM de Destino presentan entre 1 y 24 rutas, es necesario identificar qué ocurre con las UTAM con la mayor cantidad de rutas concentradas. Para esto, se precisa el *top 20* de las UTAM con mayores registros de ruta en Biko de Origen en la Figura 3-17 y de Destino en la Figura 3-18.

Figura 3-17 Top 20 de UTAM con mayores registros de Origen de ruta

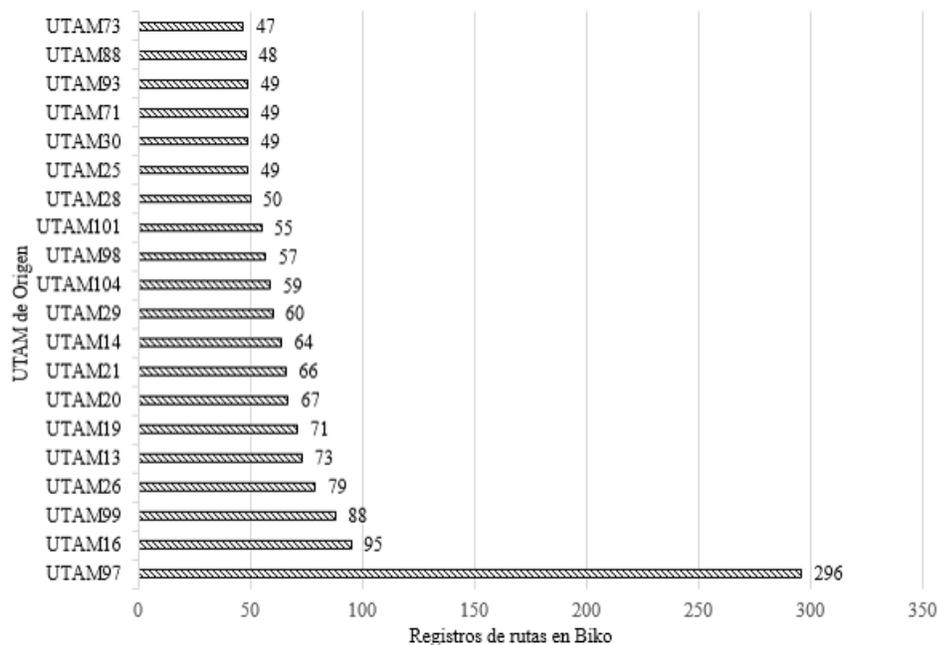
De acuerdo con el *top 5* de UTAM Origen, la Tabla 3-2 precisa las características socioeconómicas y espaciales de las UTAM identificadas. Sin embargo, se observa predominancia del estrato socioeconómico más alto en la ciudad, que puede generarse debido a que los usuarios de la aplicación Biko podrían ser de esta zona. Para confirmar si el sesgo ocurre, en la sección 3.5 se realizará la comparación geoespacial con los resultados de las rutas de ciclistas en la EM2019.

Tabla 3-2 Características generales del *top 5* de UTAM Origen

UTAM	Nombre	Estrato socioeconómico predominante	Uso del suelo predominante	Área (Ha)	Área (km ²)	Cantidad de hogares	Población estimada
97	Chicó Lago	6	Comercio y servicios	422,45	4,22	1.153	24.698
13	Los Cedros	6	Residencial	672,26	6,72	38.246	96.445
16	Santa Bárbara	6	Residencial	458,70	4,59	19.458	47.696
28	El Rincón	2	Residencial	710,09	7,10	85.108	291.665
26	Las Ferias	3	Residencial	473,34	4,73	33.458	104.131

Fuente: Elaboración propia a partir de Unión Temporal Steer – CNC (2019)

Figura 3-18 Top de UTAM con mayores registros de Destino de ruta



Al revisar la Figura 3-17 y Figura 3-18, ambas comparten el top 5 de UTAM tanto de Origen como de Destino en las rutas ciclistas, a excepción de la UTAM 99 que aparece con 88 registros para Destino y corresponde a Chapinero. Esta es una zona con predominancia de oficinas y restaurantes, entre otras características precisadas en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3 Características generales de UTAM 99 – Destino

UTAM	Nombre	Estrato socioeconómico predominante	Uso del suelo predominante	Área (ha)	Área (km ²)	Cantidad de hogares	Población estimada
99	Chapinero	4	Comercio y servicios	159,30	1,59	10.270	19.054

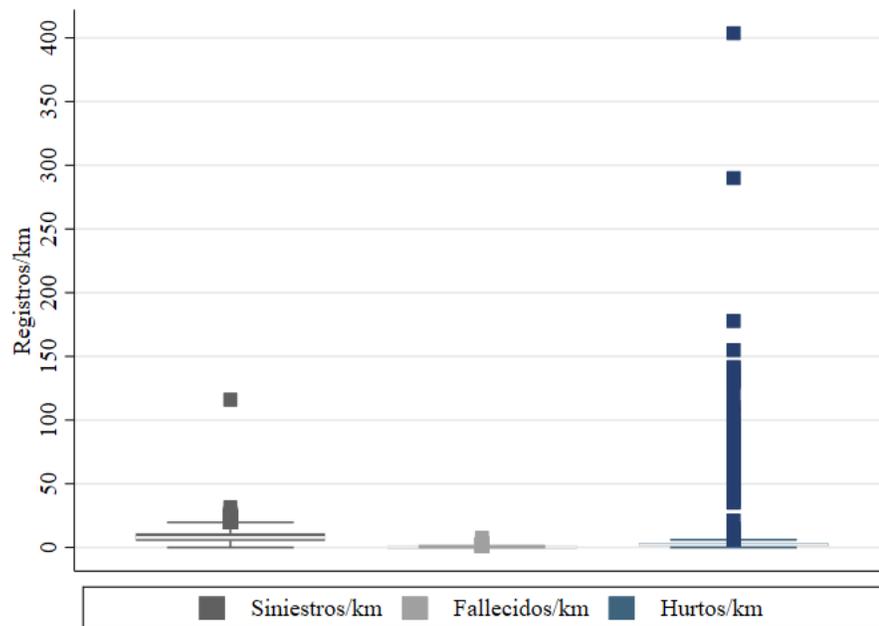
Fuente: Elaboración propia a partir de Unión Temporal Steer – CNC (2019)

3.3 Seguridad vial y seguridad ciudadana

La Figura 3-19 presenta las variables de seguridad vial (siniestros/km y fallecidos/km) y la variable de seguridad ciudadana (hurtos/km), donde el rango intercuartílico (RIC) de las tres variables se encuentra cercano a diez. Sin embargo, los bigotes y registros atípicos de la variable hurtos/km superan los de seguridad vial, incluso cuatro veces más en el valor

máximo de seguridad ciudadana, comparada con siniestros/km. La siguiente sección precisa el detalle de cada una de las tres variables.

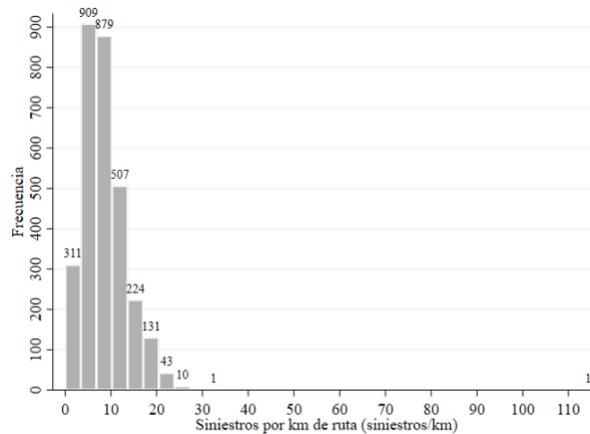
Figura 3-19 Diagrama de cajas y bigotes de variables de seguridad vial y ciudadana



3.3.1 Siniestros por km de ruta (siniestros/km)

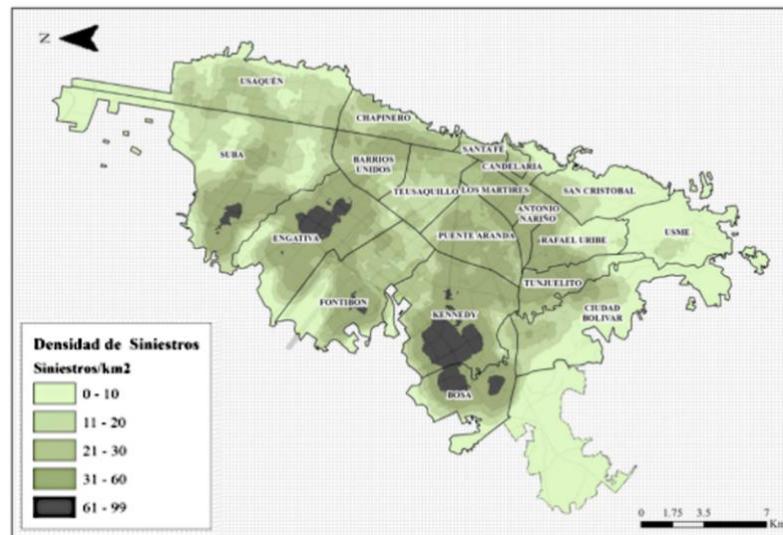
Es una variable cuantitativa continua y fue calculada a partir del registro georreferenciado de siniestros de ciclistas del año 2018, con un buffer de radio de 50 m, georreferenciado para cada ruta. La Figura 3-20 representa que 2.961 de 3.016 rutas presentan 20 siniestros anuales de ciclistas por km de ruta recorrida.

Figura 3-20 Histograma de frecuencia para siniestros por km de ruta



Sin embargo, según la Figura 3-20 hay registros que incluyen más de 20 siniestros anuales por km de ruta recorrida; incluso el valor máximo alcanza 110 siniestros registrados por km de ruta recorrido. Esto requiere un complemento geoespacial de siniestralidad, por lo que la Figura 3-21 representa las zonas con mayor siniestralidad ciclista en Bogotá. Mediante la herramienta *point density* del software ArcGIS, en la Figura 3-21 se calcula la densidad de siniestros (puntos) alrededor de cada celda ráster y se representan variaciones de color, en este caso por km², donde los valores máximos están entre 61 y 99 siniestros concentrados por km² en las localidades de Kennedy, Bosa, Engativá y Suba.

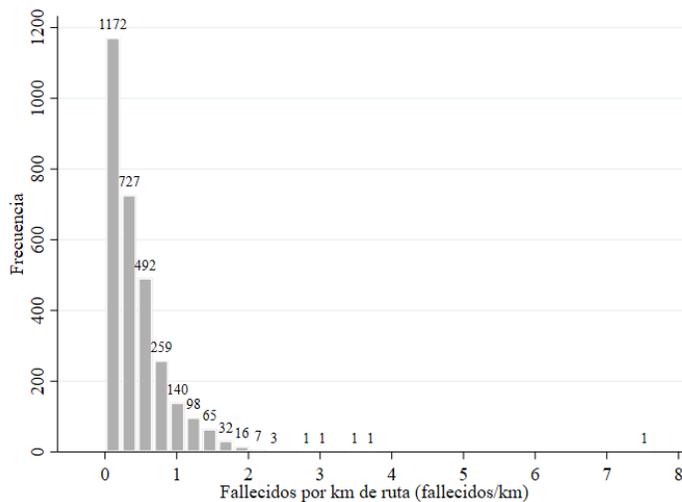
Figura 3-21 Mapa de siniestralidad a ciclistas



3.3.2 Fallecidos por km de ruta (fallecidos/km)

Es una variable cuantitativa continua y fue construida desde el registro georreferenciado de ciclistas fallecidos por seguridad vial durante 2018, con un buffer de radio de 50m para cada ruta georreferenciada. La Figura 3-22 representa que la mayoría de las rutas tienen entre 0,2 y 1 fallecido histórico anual por km de ruta recorrida.

Figura 3-22 Histograma de frecuencia para fallecidos por km de ruta

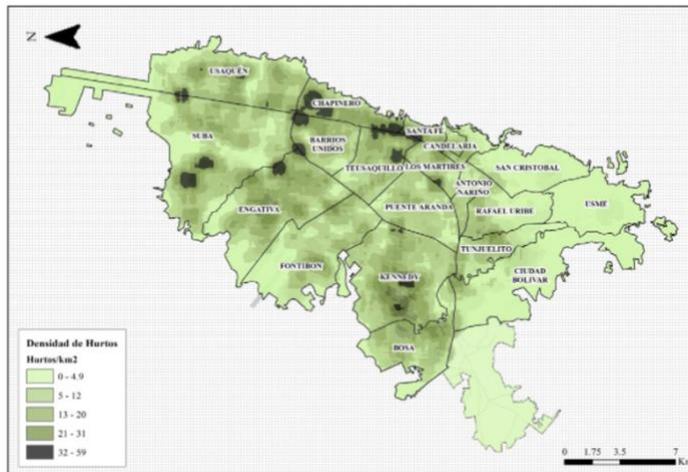


Sin embargo, de acuerdo con el histograma hay registros que incluyen más de 1 fallecido anual por km de ruta recorrida; incluso el valor máximo es superior a 7. Esto requiere un complemento geoespacial de fallecidos ciclistas que se presenta en la Figura 3-23. Este mapa fue generado a partir de la herramienta *point density* del *software* ArcGIS que calcula la densidad de fallecidos (puntos) alrededor de cada celda ráster, donde los valores máximos están entre 5,1 y 8 siniestros concentrados por km² en las localidades de Kennedy, Bosa y Engativá.

En complemento, teniendo en cuenta que fueron reportados 3.642 hurtos a ciclistas durante el año 2018 en Bogotá, con la herramienta *point density* se generó el mapa por km² de la Figura 3-25

Figura 3-25, donde se evidencian las 14 zonas de mayor concentración de registros de hurtos. Se muestran entre 32 y 59 registros por km² presentados en ocho localidades de Bogotá.

Figura 3-25 Mapa de hurtos a ciclistas



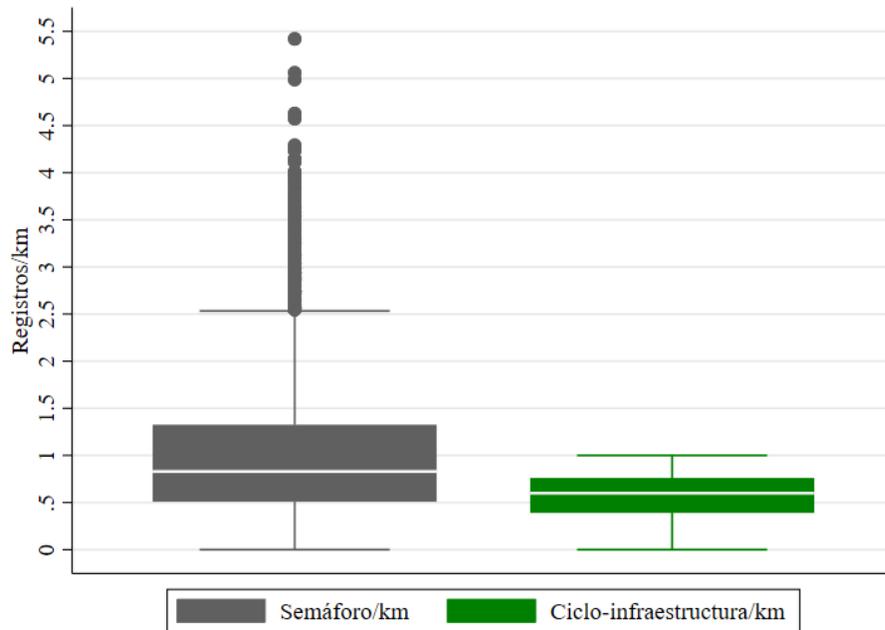
Finalmente, esta variable comprende una relevancia primordial de acuerdo con la revisión de literatura sobre robos a ciclistas (Márquez y Soto, 2021); el riesgo de robo de bicicletas también se considera un impedimento importante para el ciclismo (Sidebottom y Johnson, 2014) y un problema común (Li *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2007). En general, las bicicletas son un objetivo atractivo para el robo y los propietarios de bicicletas son más propensos a sufrir robos comparado con propietarios de automóviles y motocicletas (Sidebottom *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2007).

3.4 Infraestructura

La Figura 3-26 presenta las dos variables de infraestructura. El rango intercuartilico (RIC) de la variable ciclo-infraestructura está entre 0,4 y 0,7, sin superar el rango de valores de 0 a 1, lo cual tiene sentido porque no puede haber más ciclo-infraestructura que distancia

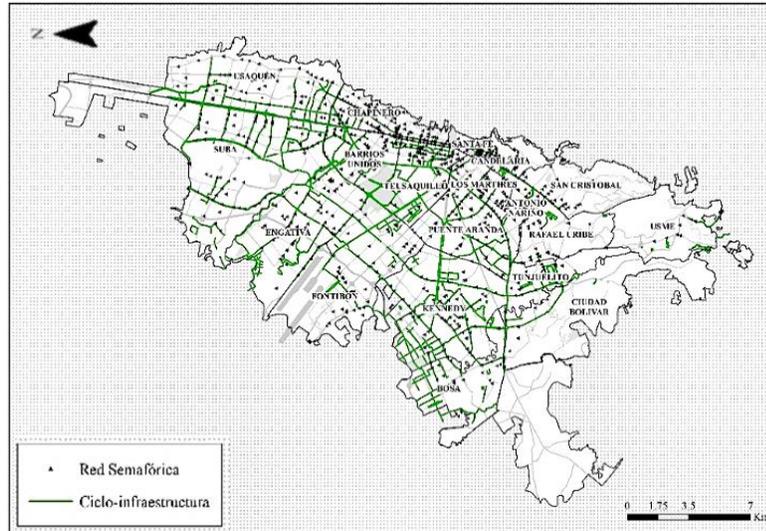
recorrida. Como máximo y el ideal, sería que esta variable tendiera a 1. Por otro lado, en promedio, es común encontrar como mínimo un semáforo por km de ruta recorrida; es decir, que por lo general los ciclistas analizados en Bogotá tienen contacto con modos motorizados una vez por km recorrido, además de representar una pausa en su ruta.

Figura 3-26 Diagrama de cajas y bigotes de variables de infraestructura



En complemento, para tener un panorama local de la infraestructura, la Figura 3-27 representa las bases de datos geoespaciales de semaforización y ciclo-infraestructura de Bogotá vigentes en el año 2018. En este mapa se identifica una agrupación predominante de semáforos en el centro oriente de la ciudad, también denominado centro ampliado de la ciudad, y un panorama general de la red de ciclo-infraestructura con zonas sin conexión o continuidad como el centro de la localidad de Suba y entre las localidades de Puente Aranda y Teusaquillo. Además, se observa inexistencia de ciclo-infraestructura en las zonas periféricas, posiblemente por la pendiente montañosa de estas zonas. Por tanto, en las secciones 3.4.1 y 3.4.2 respectivamente, se precisan las variables semáforos por km de ruta y ciclo-infraestructura por km de ruta.

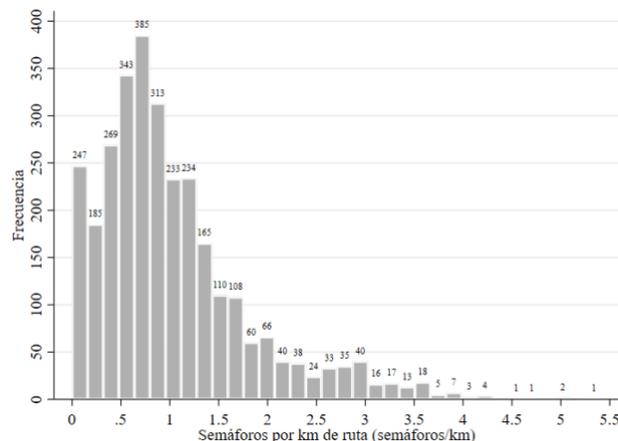
Figura 3-27 Mapa de ciclo-infraestructura y semaforización en Bogotá



3.4.1 Semáforos por km de ruta (semáforos/km)

Corresponde a una variable cuantitativa continua que se generó con el trazado georreferenciado de cada ruta de Biko y con un *buffer* de radio de 50 m sobre la red semaforica para identificar a cuántos semáforos estuvo expuesto el ciclista durante el viaje. La mayor parte de los viajes incluyen dos semáforos o menos por km recorrido y registros atípicos superiores a cuatro semáforos, como se evidencia en la Figura 3-28.

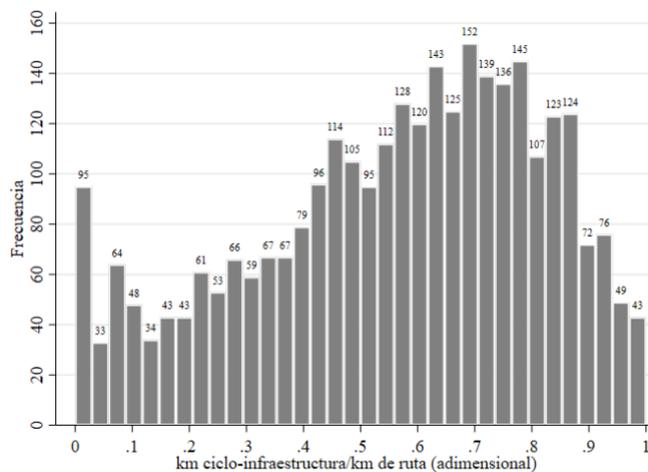
Figura 3-28 Histograma de frecuencia para semáforos por km de ruta



3.4.2 Ciclo-infraestructura por km de ruta (adimensional)

Es una variable cuantitativa continua y fue calculada al articular mediante un *buffer* de 50 m de radio cada trazado de ruta con la red de ciclo-infraestructura georreferenciada para 2018 de la Secretaría Distrital de Movilidad en Bogotá. Según la Figura 3-29, esta es la variable con comportamiento más normalmente distribuido en este estudio. Se debe tener en cuenta que la precisión de las bases de datos geográficas no permite reconocer que el ciclista sí usó ciclo-infraestructura, sino que el recorrido que hizo tenía disponible algún tipo de ciclo-infraestructura.

Figura 3-29 Histograma de frecuencia para ciclo-infraestructura por km de ruta



3.5 Discusión de resultados frente a la Encuesta de Movilidad 2019

La discusión de resultados de este estudio frente a la EM2019, con respecto a los ciclistas, tuvo en cuenta la temporalidad de la información en la Tabla 3-4, las variables de la Tabla 3-5 y los resultados obtenidos con respecto a los pares Origen- Destino.

Tabla 3-4 Comparación de temporalidad y registros válidos frente a la EM2019

Método	Temporalidad de la toma de información	Cantidad de viajes/rutas válidas	Condición de validación
Este estudio a partir de registros Biko	1 a 28 de febrero de 2018	3.016	Revisión geoespacial y estadística

Método	Temporalidad de la toma de información	Cantidad de viajes/rutas válidas	Condición de validación
EM2019, sección viajes en bicicleta	22 a 28 de febrero de 2019	74	Campos diligenciados de fecha y hora
	1 a 31 de marzo de 2019	855	
	1 al 30 de abril de 2019	885	
	1 al 31 de mayo de 2019	1.171	
	1 al 27 de junio de 2019	643	
	4 al 27 de julio de 2019	862	
	Total 22 de febrero a 27 de julio de 2019	4.490	

La Tabla 3-4 confirma que, para el análisis de ciclistas, la inversión de la toma de información en campo durante seis meses podría reemplazarse por resultados más detallados si se accediera a los registros de aplicaciones móviles, donde en un mes se obtuvo el 67% de rutas en comparación con lo que se obtuvo en seis meses con la EM2019.

Por otro lado, la Tabla 3-5 precisa que, de las 19 variables para caracterizar ciclistas y su ruta, este estudio a partir de registros de Biko permite generar 14 variables. Además, las variables sociales como género, edad y ocupación podrían ser una oportunidad de mejora para estas aplicaciones móviles y, en política pública, una opción para motivar el diligenciamiento de estos campos.

Por otro lado, con respecto a la EM2019, esta dispone de la información suficiente para generar 9 variables y es un método fortalecido en variables socioeconómicas del ciclista. Sin embargo, la caracterización de ruta es inviable mediante la EM2019, debido a la subjetividad de la duración del viaje, el Origen y el Destino, que dependen de la precisión del encuestado.

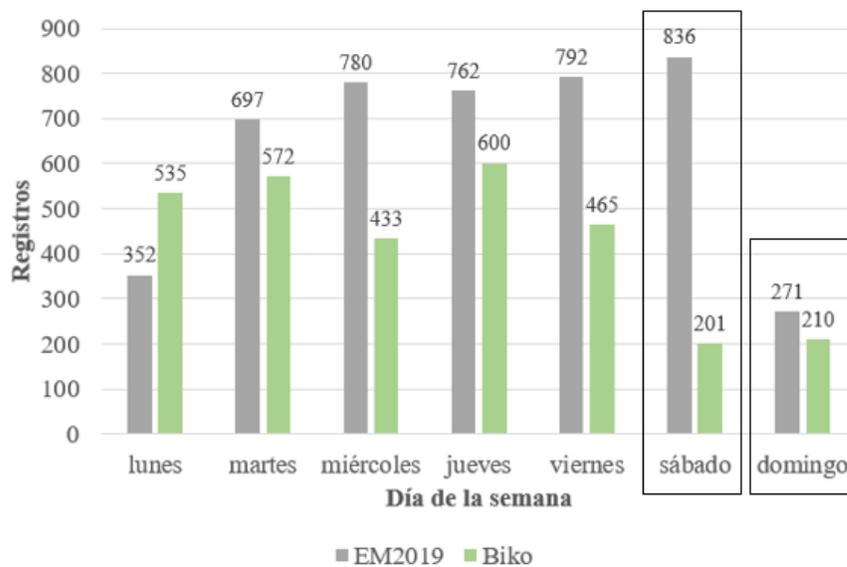
Tabla 3-5 Comparación de disponibilidad de variables frente a la EM2019

Variable de comparación/discusión	Este estudio basado en Biko	EM2019
Género		✓
Edad		✓
Ocupación		✓
Agresión durante la ruta		✓
Día de ruta	✓	✓
Hora de inicio de ruta	✓	✓
Duración de ruta	✓	Depende de la percepción de tiempo del encuestado
Motivo de ruta		✓

Variable de comparación/discusión	Este estudio basado en Biko	EM2019
Velocidad de ruta	✓	
Ruta georreferenciada	✓	
Longitud de ruta	✓	
Longitud recta de ruta	✓	
Sinuosidad	✓	
Cantidad de semáforos por km de ruta	✓	
Cantidad de siniestros por km de ruta	✓	
Cantidad de hurtos por km de ruta	✓	
Cantidad de fatalidades por km de ruta	✓	
Cantidad de km de ciclo-infraestructura por km de ruta	✓	
Par O-D con nivel de desagregación por UTAM	✓	✓
Total variables	14	9

Además, las cuatro variables en común de ambos métodos identificadas en la Tabla 3-5 (día de ruta, hora de inicio de ruta, duración de ruta y el Origen-Destino) son precisadas a continuación con su respectiva comparación frente a la EM2019.

Figura 3-30 Comparación día de ruta frente a la EM2019



La Figura 3-30 evidencia que el domingo es el día con menos registros en la EM2019, mientras que en Biko es el segundo día más bajo después del sábado, teniendo en cuenta que

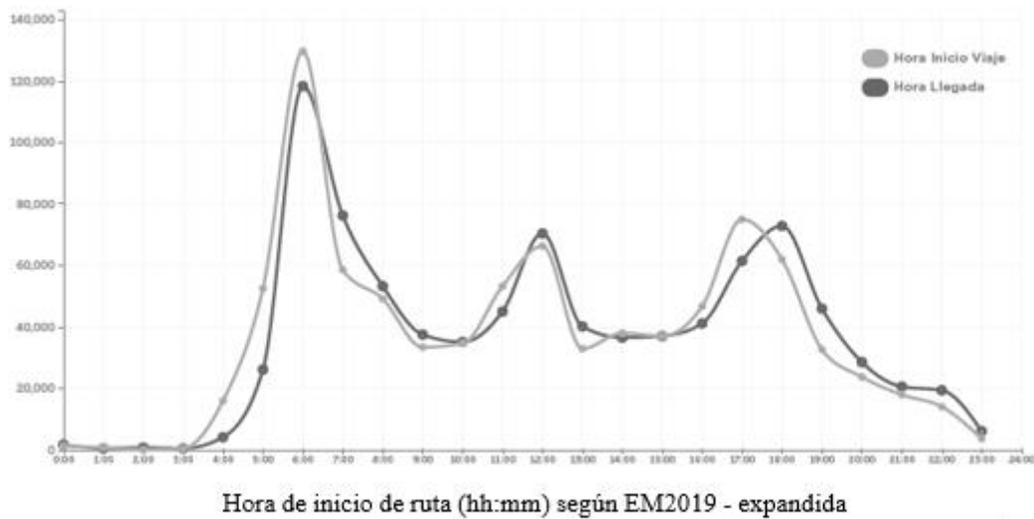
en Bogotá los domingos se realiza el programa Ciclovía recreativa¹. Esto plantea una necesidad de profundizar en próximas investigaciones sobre los ciclistas que realizan su ruta entre semana. Por otro lado, ambos métodos se contradicen con respecto al sábado, ya que la EM2019 indica que este es el día con más registros y en Biko es el de menos registros durante la semana.

En la EM2019, aunque se tienen los valores en todos los horarios de los viajes en bicicleta, usualmente se reportan solo los registros en una hora pico y hora valle determinadas por el modelo de transporte que en su mayoría de casos tiene en cuenta los modos motorizados.

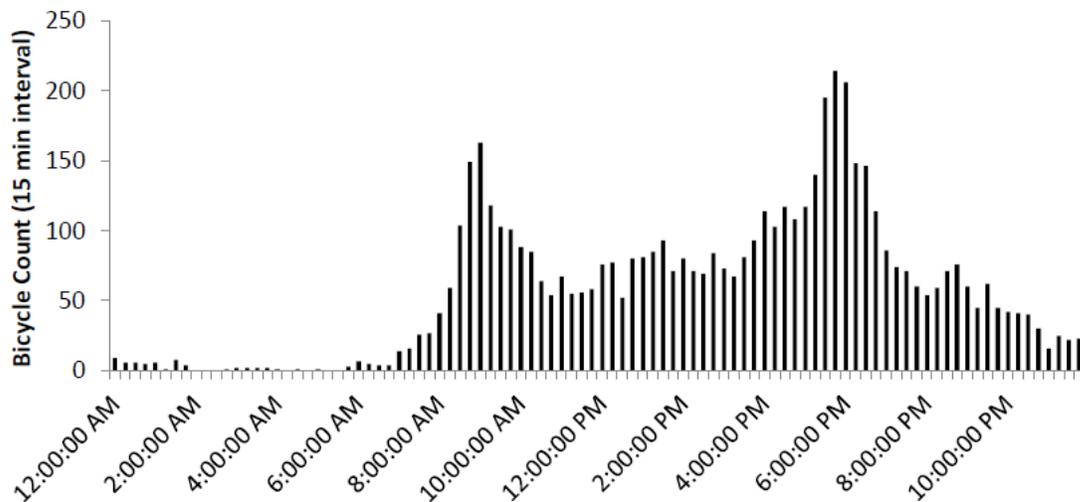
Sin embargo, para este estudio se comparó el perfil horario de ambos métodos para la variable hora de origen de ruta, como se presenta en la Figura 3-31, donde coinciden los picos de las 6:00 y las 17:00 horas. Este último es más relevante en los registros de Biko, pero difiere del pico que reporta la EM2019 al medio día.

¹ “La Ciclovía bogotana presta su servicio de 7:00 a.m. a 2:00 p.m. todos los domingos y festivos del año por las principales vías de la ciudad que están interconectadas en un circuito de 127.69 kilómetros de extensión, de los cuales 7.05 km son de cicloruta. (...) En promedio un millón y medio (1.500.000) de usuarios disfrutaban de este espacio recreo-deportivo conocido actualmente como el parque lineal más grande del mundo.” (IDRD, 2019)

Figura 3-31 Perfil horario de inicio de ruta de ciclistas frente a la EM2019



Adicionalmente, los datos anteriores se comparan en la Figura 3-32 con un estudio en Canadá a partir de contadores de bicicletas que presenta un perfil horario (Beitel, 2021) con dos picos predominantes, uno a las 18:00 y otro cerca de las 9:00.

Figura 3-32 Perfil horario estudio de caso Canadá

Fuente: Beitel (2021)

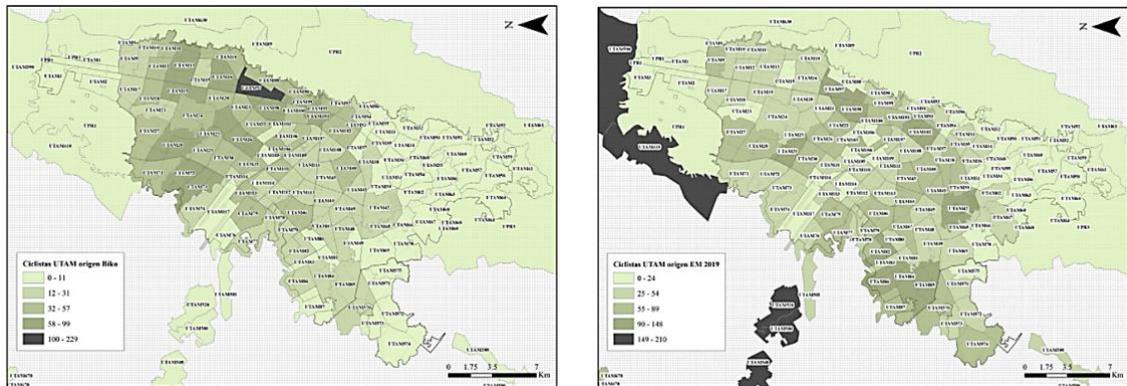
La Tabla 3-6 precisa que la variable duración de ruta difiere en 9 minutos con respecto a lo reportado en la EM2019 como promedio de viaje en bicicleta sin incluir tiempo de caminata (Unión Temporal Steer-CNC, 2021).

Tabla 3-6 Duración de ruta frente a la EM2019

Variable	Media (min)	Media(h)	Condición
Duración de ruta según este estudio a partir de Biko	43,71	0,73	Consistencia geoespacial y de depuración estadística precisada en la sección 3.1. para cada ruta
Duración de viaje en bicicleta según EM2019	34,70	0,58	Mayor o igual a 3 minutos

Por último, respecto al Origen-Destino por desagregación de UTAM, en la Figura 3-33, se compara el Origen de las dos fuentes de información y en la Figura 3-34 se comparan según Destino. Se precisa que, en ambas comparaciones, la EM2019 incluye un énfasis en los municipios que limitan con Bogotá al norte y al suroccidente.

Figura 3-33 Mapas de Origen desagregado por UTAM

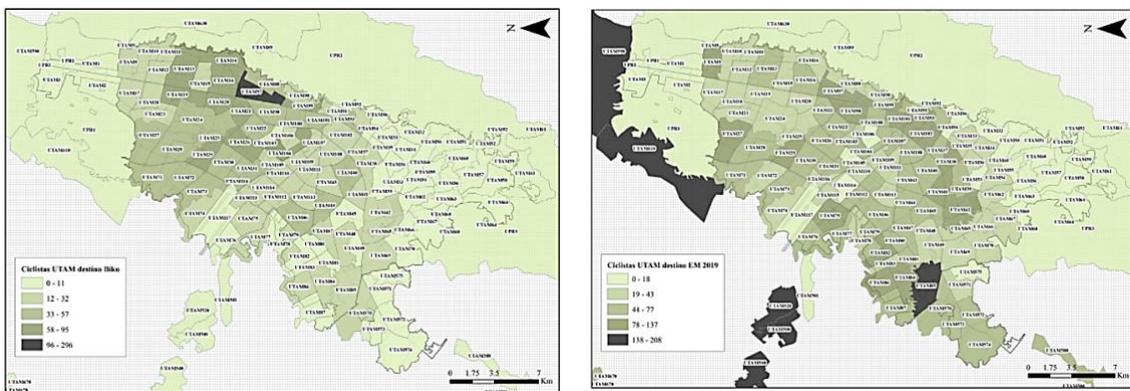


Este estudio a partir de Biko

EM2019

La Figura 3-33 muestra que la UTAM 97 predomina en Origen principal, seguida por UTAMs distribuidas en el noroccidente de Bogotá según Biko. En la EM2019, la zona de la UTAM 97 también tiene relevancia; sin embargo, las siguientes zonas más relevantes se presentan en el suroccidente de Bogotá. En ambos casos, la concentración de los registros en la zona sur es semejante.

Figura 3-34 Mapa de rutas Biko con Destino desagregado por UTAM



Este estudio a partir de Biko

EM2019

La Figura 3-34 también presenta a la UTAM 97 – Chicó Lago como Destino principal, seguido por UTAMs distribuidas en el nororiente de Bogotá, según Biko. En la EM2019 la zona de la UTAM 85 – Bosa Central tiene mayor relevancia; no obstante, las siguientes

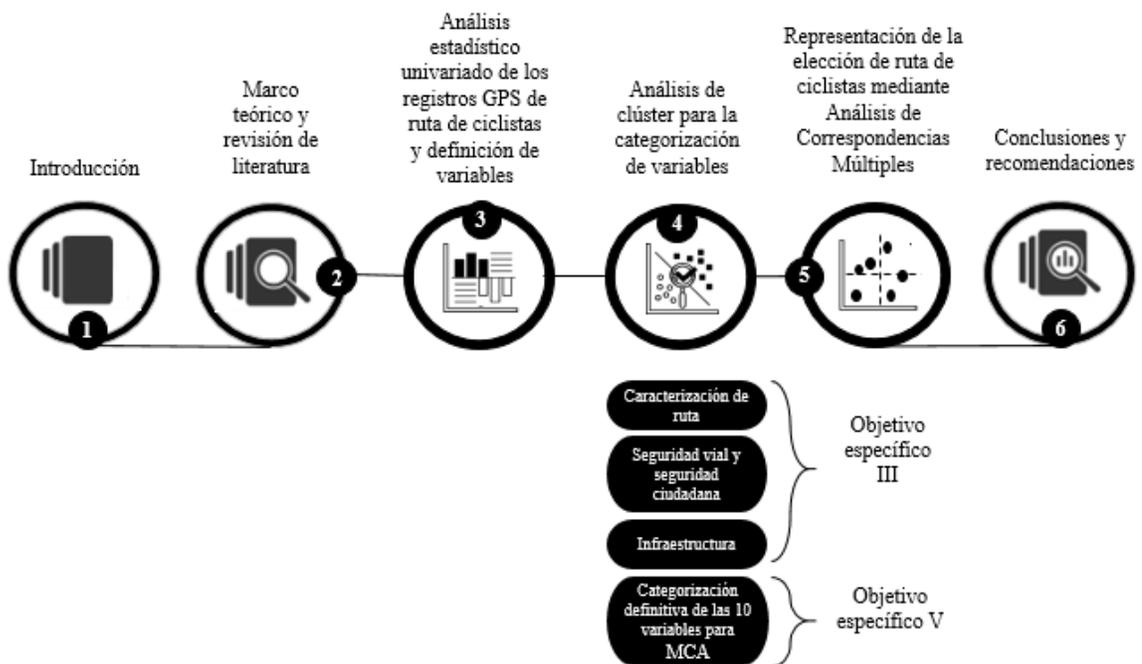
zonas más relevantes se presentan entre el occidente y centro ampliado de la ciudad. En ambos casos, la concentración de los registros en la zona sur es semejante.

Finalmente, con la base de datos de 3.016 registros construida y depurada, y con los análisis estadísticos, geoespaciales y comparativos con la EM2019, se procede a caracterizar cada una de las variables mediante análisis de clúster.

4 Análisis de clúster para la categorización de variables

A partir del análisis estadístico univariado de variables cuantitativas desarrollado en el capítulo 3 y para llevar a cabo el análisis estadístico multivariado mediante Análisis de Correspondencias Múltiple (MCA), en el capítulo 5, se requiere como condición metodológica que las variables incluidas en el MCA sean categóricas. Por lo tanto, este capítulo desarrolla los objetivos específicos III y V, como se resume en la Figura 4-1.

Figura 4-1 Diagrama resumen del capítulo 4



En las secciones 4.1, 4.2 y 4.3 se precisan cada una de las variables, agrupadas por caracterización de ruta, seguridad vial y seguridad ciudadana e infraestructura, respectivamente. Adicionalmente, la sección 4.4 resume la categorización definitiva para usar en el MCA, generar una discusión frente a la EM2019 y teniendo como referente el análisis de clúster mediante el diagrama de *Silhouette*, que se realizó en Bogotá, como primer paso para el análisis de accesibilidad de ciclistas a partir de 968 registros de la

Encuesta de Movilidad 2015 (Rosas-Satizábal, Guzmán y Oviedo, 2020); se precisa que en esa ocasión se implementó la metodología incluyendo nueve variables y obteniendo tres clústeres para caracterización ciclista. Caso contrario al presente estudio donde el análisis de clúster se detalla para categorizar cada variable.

En la descripción de cada variable se detalla el análisis de diagrama de *Silhouette*, el análisis de clúster mediante las librerías en RStudio precisado en la Tabla 4-1, el criterio para nombrar cada variable y el análisis de los resultados.

Tabla 4-1 Librerías utilizadas en RStudio

Librería	Utilidad	Referencia
Lubridate	Funciones para trabajar con fechas-horas e intervalos de tiempo.	(RStudio, 2021)
Biclust	Proporciona algoritmos para realizar análisis de clúster en datos continuos y discretos simultáneamente.	(RStudio, 2006)
NbClust	Proporciona 30 índices para determinar el número óptimo de clústeres en un conjunto de datos y ofrece el mejor esquema de clústeres.	(RStudio, 2015)
Clustertend	Calcula algunas estadísticas con el objetivo de ayudar a analizar la tendencia de agrupamiento de datos.	(RStudio, 2021)
Ggplot2	Un sistema para crear gráficos basado en "La gramática de los gráficos".	(RStudio, 2021)

4.1 Caracterización de ruta

En esta sección, se categorizan cuatro de las siete variables incluidas en el capítulo 3.2, ya que se excluyeron las variables “longitud recta de ruta”, “sinuosidad” y “Origen y Destino”. La primera se analizó para identificar viajes cíclicos, la segunda para identificar qué tan curvilínea fue la ruta (además de reportar clústeres unitarios iterativamente, razón por la que no hay argumento estadístico para categorizar esta variable) y la tercera para identificar un patrón geográfico. Sin embargo, estas tres variables tienen su alcance resuelto con el análisis

univariado. Finalmente, se agregaron las variables: “Día de inicio de ruta”, “Tipo de ciclista según día de ruta” y “hora de inicio de ruta”.

4.1.1 Día de inicio de ruta

Esta variable ya tiene determinada la categorización con los días de la semana; por lo tanto, no se realiza análisis de clúster en este caso. Sin embargo, como la base de datos incluye el mes de febrero de 2018, donde se lleva a cabo el primer jueves del mes la campaña del día sin carro en la ciudad de Bogotá, se incluyó una agrupación de la categoría denominada “jueves_sin_carro”, para un total de 8 agrupaciones en esta variable categórica, como se presenta en la Figura 4-2.

Figura 4-2 Agrupaciones de la categoría “día de la semana”



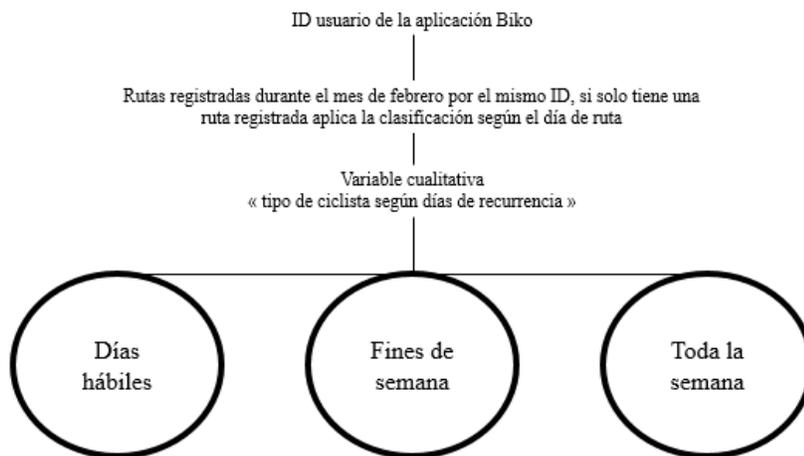
La agrupación “jueves_sin_carro” representa la segunda categoría con menos registros atribuidos. Sin embargo, teniendo en cuenta que las demás categorías agrupan los cuatro días del mes, esta de un solo día resulta relevante e incluso cercana a todos los domingos de febrero donde hay ciclovía dominical.

4.1.2 Tipo de ciclista según día de ruta

De acuerdo con la variable 4.1.1. se genera la variable del “tipo de ciclista”, para lo cual se crea una variable categórica a partir de los ID de los usuarios de Biko de acuerdo con los días registrados para ese mismo ID; si el ID de usuario solo tiene una ruta registrada con ese día, se realiza la categorización y se clasifica en ciclista que viaja “días hábiles”, “fines de

semana” y “toda la semana”. Este último para los casos donde el ciclista reporta tanto rutas de lunes a viernes y en sábado o domingo, como se precisa en la Figura 4-3.

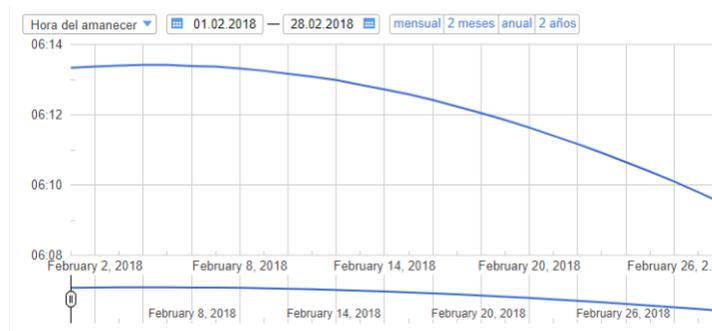
Figura 4-3 Variable tipo de ciclista según días en que viaja



4.1.3 Hora de inicio de ruta

Por otra parte, se incluyó una variable adicional denominada “horario de inicio de ruta”, la cual no requirió de análisis de clúster, pero sí un referente técnico para su clasificación. Por lo anterior, de acuerdo con la ubicación geográfica de Bogotá y la proyección horaria de amanecer precisada en la Figura 4-4, se tiene en cuenta que durante febrero de 2018 en Bogotá amaneció entre el horario de las 6:09 y 6:13 horas.

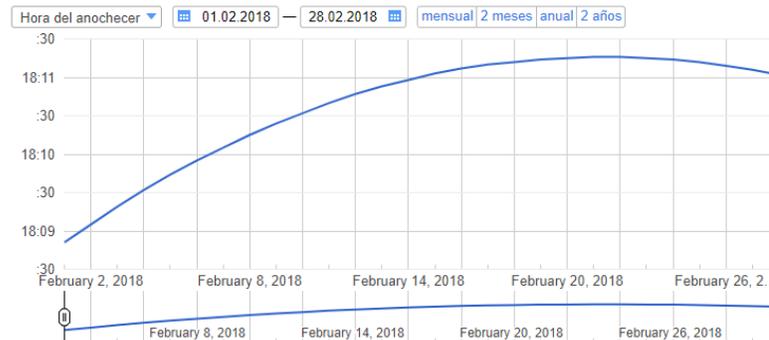
Figura 4-4 Hora de amanecer durante febrero 2018 en Bogotá



Fuente: [\(https://salidaypuestadelsol.com/sun/bogota_\(colombia\)\)](https://salidaypuestadelsol.com/sun/bogota_(colombia)) (2018)

Así mismo, la jornada de anochecer durante febrero 2018 en Bogotá inició entre las 18:09 y 18:11 horas, como se representa en la Figura 4-5.

Figura 4-5 Hora de anochecer durante febrero 2018 en Bogotá



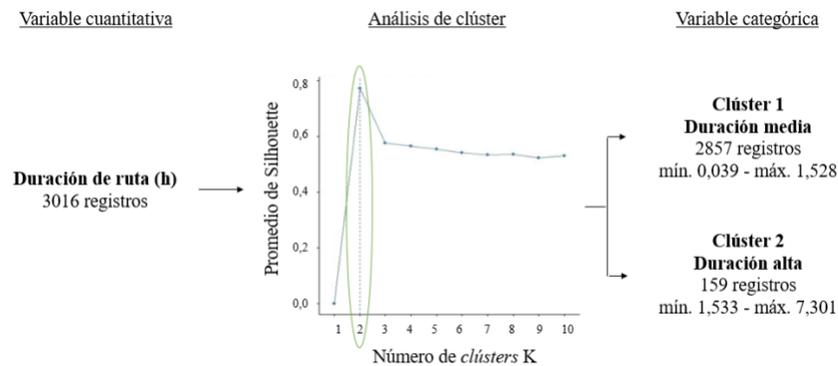
Fuente: [https://salidaypuestadelsol.com/sun/bogota_\(colombia\)](https://salidaypuestadelsol.com/sun/bogota_(colombia)) (2018)

Como resultado para esta variable, se definió la jornada diurna entre las 6:09 y las 18:09 y se categorizó en jornadas diurna y nocturna.

4.1.4 Duración de ruta

Con la función *k-means* y con el gráfico de distancia promedio de *Silhouette* en RStudio, se identifica el número óptimo de clústeres, donde el punto con el mayor valor en las ordenadas corresponde a la cantidad de agrupaciones sugeridas para el conjunto de registros de la variable cuantitativa “duración de ruta”; esto se precisa en la Figura 4-6.

Figura 4-6 Categorización mediante análisis de clúster para duración de ruta

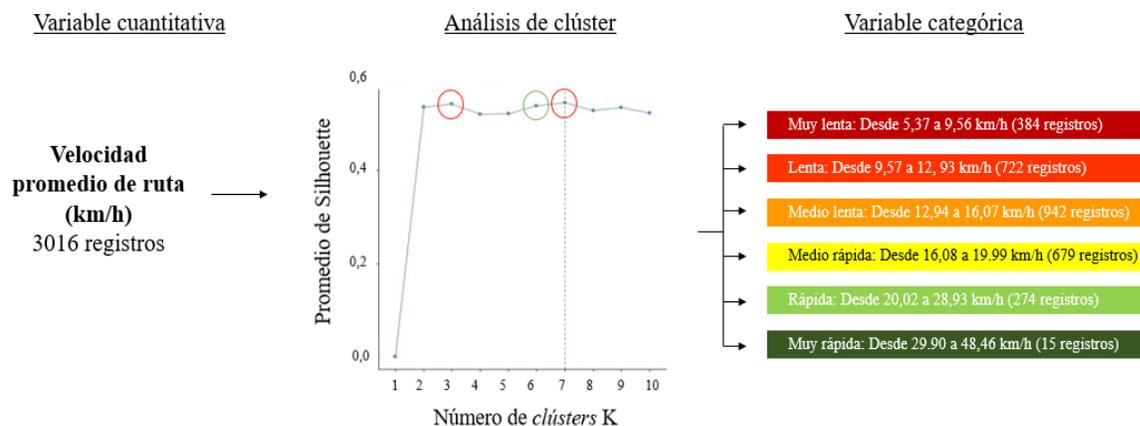


El diagrama de *Silhouette* teóricamente se encuentra entre -1 y 1, donde entre más cercano a 1 implica que esa agrupación es homogénea entre los registros que la componen. Para este caso, dos clústeres representan un valor de 0,78 en las ordenadas del diagrama; razón por la que la variable “duración de ruta” se categoriza en duración media y duración alta. Se precisa duración media y no baja, ya que el clúster 1 representa el 95% de los registros con 2.857; es decir, en este se encuentra la media de los registros.

4.1.5 Velocidad promedio de ruta

Al replicar la función *k-means* con el gráfico de distancia promedio de *Silhouette* en RStudio, para la variable velocidad promedio de ruta, resultan tres posibles cantidades de clústeres, como se precisa en la Figura 4-7. Los valores más altos en las ordenadas corresponden a 0,54 (para tres y seis clústeres) y 0,55 (para siete clústeres), teniendo en cuenta que en una clasificación categórica se sugiere una cantidad par para evitar tener un grupo intermedio; se elige seis como cantidad óptima de clústeres.

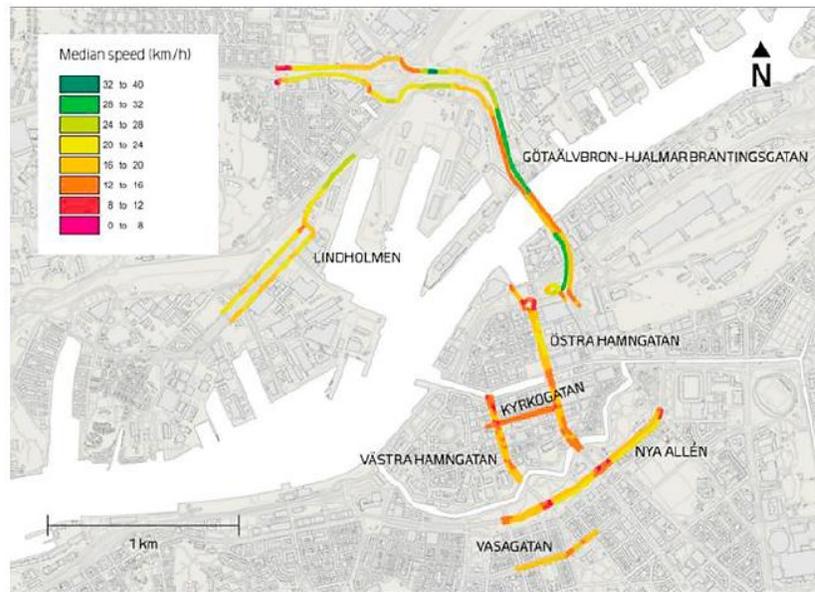
Figura 4-7 Categorización mediante análisis de clúster para velocidad promedio de ruta



Por lo anterior, una vez seleccionados seis clústeres en RStudio, se agrupa la base de datos en seis rangos sugeridos de acuerdo con la distancia que los agrupa, lo que garantiza agrupaciones estadísticamente homogéneas. Finalmente, para elegir el nombre de los seis grupos (muy lenta, lenta, medio lenta, medio rápida, rápida y muy rápida) que componen la

variable categórica resultante, se complementó con un estudio de velocidad promedio de ciclistas realizado en Gotemburgo, Suecia (Manum, Arnesen, Nordstrom y Gil, 2019), donde a partir de datos GPS de rutas en bicicleta se realizó una caracterización de velocidad en escala de color tipo semáforo, desde los valores más rápidos (40 km/h), en color verde, hasta los valores más lentos en color rojo y rosa (0 a 12 km/h), como se representa en la Figura 4-8 y se identifica que, en Bogotá con 48,46 km/h, el valor máximo de velocidad promedio supera al del estudio en Gotemburgo con 40 km/h.

Figura 4-8 Referente internacional de análisis y clasificación de velocidad promedio



Fuente: Manum, Arnesen, Nordstrom, y Gil (2019)

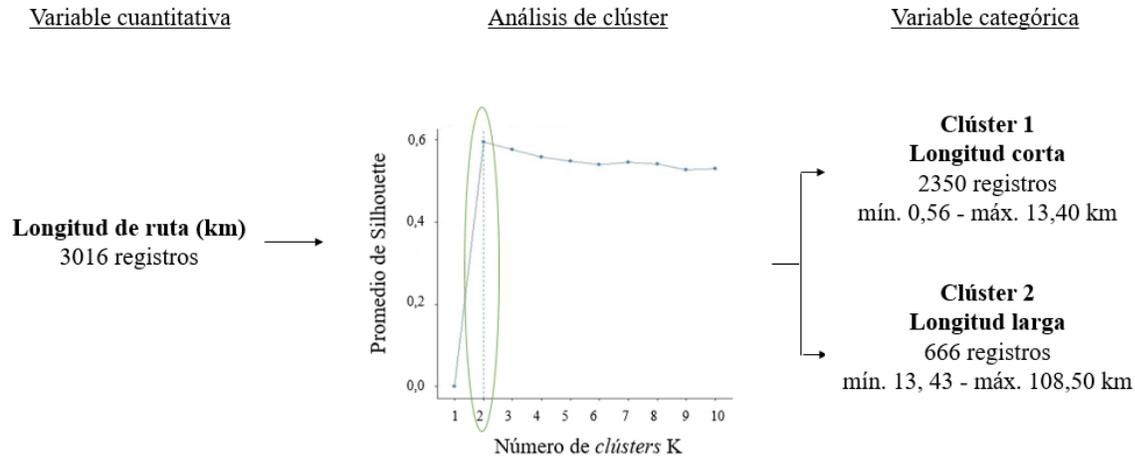
4.1.6 Longitud de ruta

La Figura 4-9 precisa el gráfico de distancia promedio de *Silhouette*, en RStudio, para la variable longitud de ruta con la función *k-means*. El valor en las ordenadas que resalta sobre las opciones de 1 a 10 posibles clústeres es 0,59, que sugiere dos grupos para esta variable.

Por tanto, para denominar los dos grupos, se tuvo en cuenta el proyecto de la Unión Europea Mobile 2020 (Deffner, Hefter, Rudolph y Ziel, 2012), que precisa el ciclismo como un modo de transporte de distancia corta, definida para una longitud entre 1 km hasta 10 km y

distancia larga superior a 10 km; esta última usualmente para ciclismo recreativo y si es ciclismo urbano se sugiere la intermodalidad con transporte público.

Figura 4-9 Categorización mediante análisis de clúster para longitud de ruta



De acuerdo con lo anterior, para la categoría longitud de ruta se definieron dos clústeres; el primero “longitud corta” con el 78% de los registros, “longitud larga” para el segundo clúster con los registros restantes y se precisa que el caso de los registros Biko para Bogotá, con un rango de hasta 13,4 km, supera el valor de 10 km de distancia utilizado en las ciudades europeas como ruta de distancia corta en bicicleta.

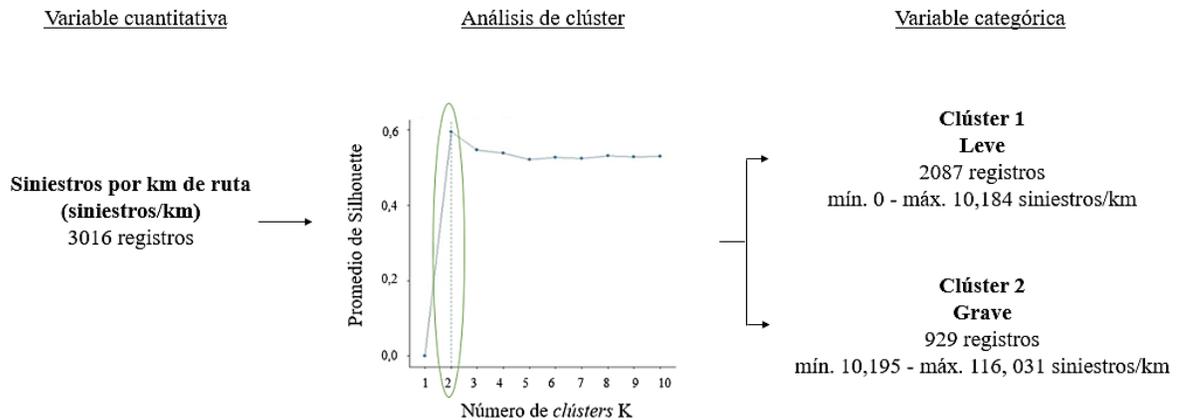
4.2 Seguridad vial y seguridad ciudadana

A continuación, se detalla la categorización de las tres variables de la sección 3.3. siniestros, fallecidos y hurtos; las tres determinadas por km de ruta recorrida inicialmente.

4.2.1 Siniestros por km de ruta

A partir de la función *k-means* y con el gráfico de distancia promedio de *Silhouette*, en RStudio, se identifica el número óptimo de dos clústeres para la variable de siniestros por km de ruta; donde el punto con el mayor valor en las ordenadas corresponde a 0,59, como se precisa en la Figura 4-10, donde el clúster 1 incluye el 69% de los registros.

Figura 4-10 Categorización mediante análisis de clúster para siniestros por km de ruta



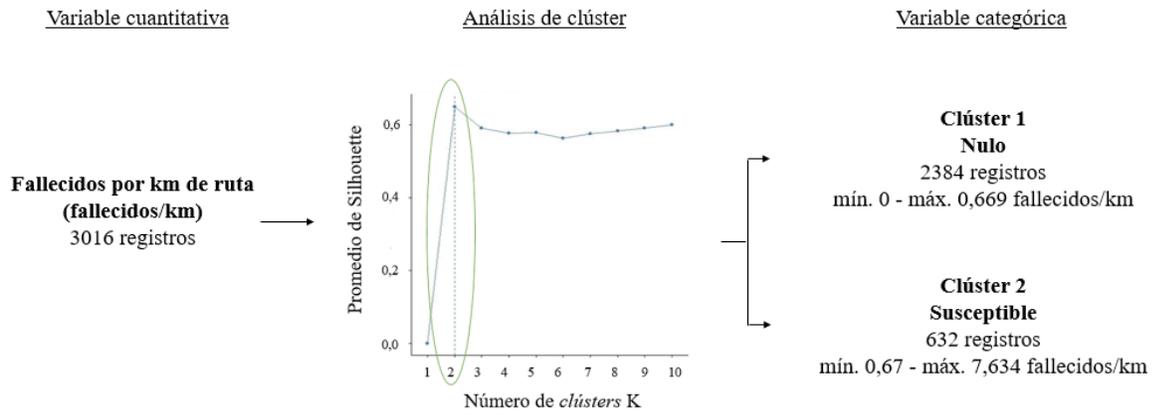
Por tanto, para esta variable y en el marco de la seguridad vial, teniendo como referente la caracterización de lesiones, siniestros y exposición categorizadas como leves y graves a nivel internacional (Zamora Rojas y Pujol Mesalles, 2009) y en Bogotá para ciclistas (Sáenz Galvis, 2015), se adaptan los términos “leve” y “grave” para determinar que: si en la ruta recorrida por km existe un registro anual de 0 a 10,184 siniestros, se puede considerar leve (clúster 1 agrupado estadísticamente) respecto al total de la muestra, donde más de 10,195 siniestros/km de ruta recorrida hacen parte del clúster 2 identificado en este estudio con la categoría “grave”.

Adicionalmente, se precisa que esta categoría se generó solo para este estudio con su respectivo soporte estadístico y geográfico en el numeral 3.3.1, que implica una aproximación alternativa y complementaria para el aprovechamiento de la base de datos de la Secretaría Distrital de Movilidad, a partir de los registros del formato IPAT - Informe Policial del Accidente de Tránsito.

4.2.2 Fallecidos por km de ruta

Con la función *k-means* y el gráfico de distancia promedio de *Silhouette*, en RStudio, se identifica que para la variable de “fallecidos por km de ruta”, en la Figura 4-11, el mayor valor en las ordenadas es 0,64 correspondiente a dos clústeres, donde el clúster 1 incluye el 79% de los registros de la muestra.

Figura 4-11 Categorización mediante análisis de clúster para fallecidos por km de ruta

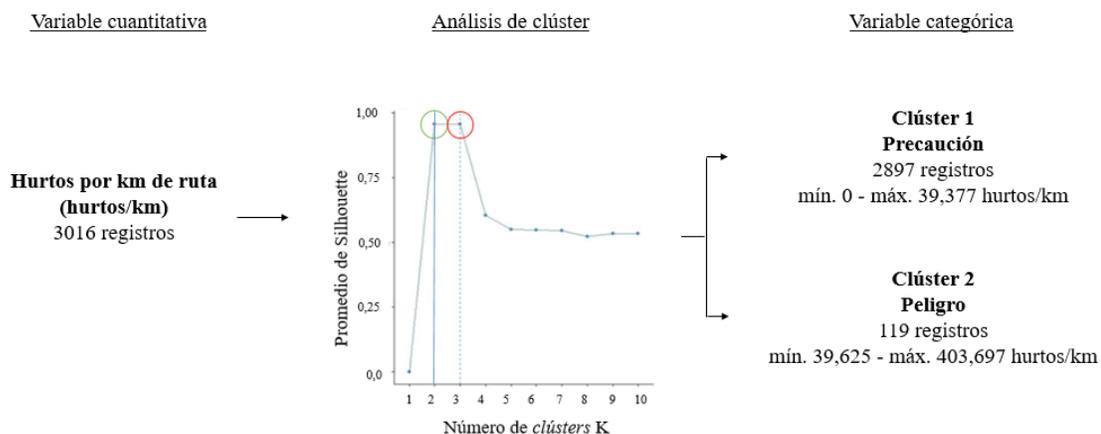


Una vez identificados los registros para los dos clústeres, a partir de RStudio, se encontró en la literatura que usualmente fallecidos y siniestros hacen parte de una misma variable de seguridad vial (Zhu, 2021) o para caracterizar el tipo de colisión o choque (Xie, Ozbay, Yang, Xu y Yang, 2021).

Sin embargo, para este estudio y de acuerdo con los rangos de los registros del clúster 1, desde 0 a 0,67 fallecidos por km de ruta recorrido se eligió la categoría “nulo” y para el clúster 2, como su rango incluye hasta 7,63 fallecidos por km de ruta de un historial georreferenciado de un año, y como esta variable pretende dimensionar, pero no predecir, se elige el término “susceptible”, con el fin de advertir la vulnerabilidad de acuerdo con los registros.

4.2.3 Hurto por km de ruta

Para la variable hurtos por km de ruta recorrida, con el análisis de *k-means* y el diagrama de *Silhouette* en RStudio, ocurrió un resultado similar a la variable velocidad promedio de ruta, de la sección 4.1.5; es decir, se encontró más de un valor predominante en las ordenadas. como se muestra en la Figura 4-12, donde se identifica 0,95 para 2 y 3 clústeres. Sin embargo, teniendo en cuenta que en una clasificación categórica se sugiere una cantidad par, se eligió una agrupación de 2 clústeres.

Figura 4-12 Categorización mediante análisis de clúster para hurtos por km de ruta

En la guía de hurtos de bicicleta de la Universidad de Arizona (Johnson, Sidebottom y Thorpe, 2008) se identificó que comprender el problema del robo de bicicletas es complejo porque los datos policiales generalmente presentan subregistro. Lo anterior se concluyó a partir de los datos de la Encuesta *International Crime Victim* (2000), que muestra que en 17 países encuestados (incluido Estados Unidos), en promedio, solo el 56% de robos de bicicletas fueron denunciados a la policía. Además, la guía sugiere que lo primero que se debe hacer es dimensionar el problema mediante datos.

Por otro lado, se encontró que, para analizar robos de bicicleta, estos análisis se limitan a los sistemas de bicicletas compartidas y para ello se realizan encuestas por grupos focales, donde la clasificación de la variable de hurto a bicicletas se agrupa en *theft / safety* (Hoe y Kaloustian, 2014).

Por tanto, para esta variable se eligen dos clústeres según el análisis estadístico, como lo precisa la Figura 4-12, y para su categorización se tuvieron en cuenta los términos de señalización vial donde se precisa precaución y peligro, ya que los registros de hurtos son históricos anuales.

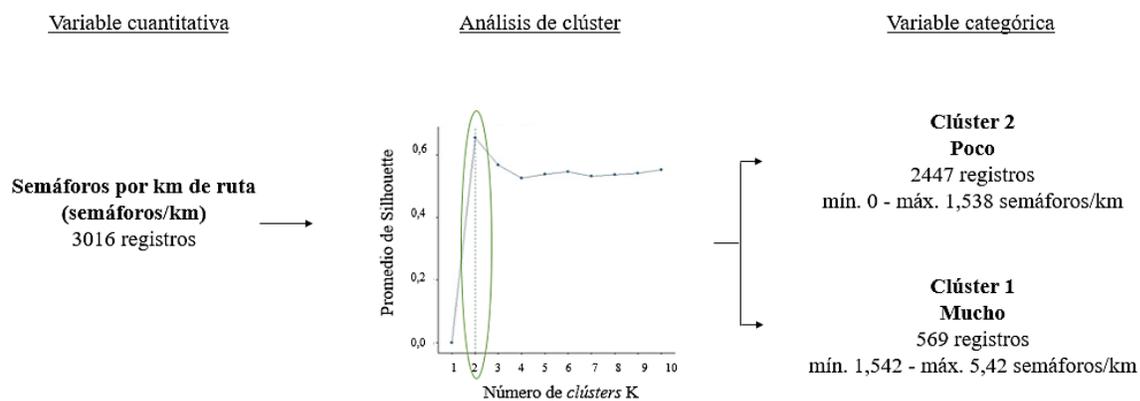
4.3 Infraestructura

En esta sección se incluye el detalle del proceso de categorización de las dos variables de la sección 3.4, semáforos y ciclo-infraestructura por km de ruta.

4.3.1 Semáforos por km de ruta

La Figura 4-13 muestra el gráfico de distancia promedio de *Silhouette*, en RStudio, para la variable semáforos por km de ruta con la función *k-means*. El valor en las ordenadas, que resalta sobre las opciones de 1 a 10 posibles clústeres, es 0,67, que sugiere estadísticamente dos grupos para esta variable.

Figura 4-13 Categorización mediante análisis de clúster para semáforos por km de ruta



Una vez revisada la literatura, se encontró que un estudio en Finlandia (Anagnostopoulos, Ferreira, Samodelkin, Ahmed y Kostakos, 2016) identificó que el ciclismo en *smart cities* puede ser más seguro si se mejora con una infraestructura de semáforos inteligentes y se puede generar un modelo de detección para habilitar un sistema de semáforos con reconocimiento de ciclistas a partir de sensores GPS.

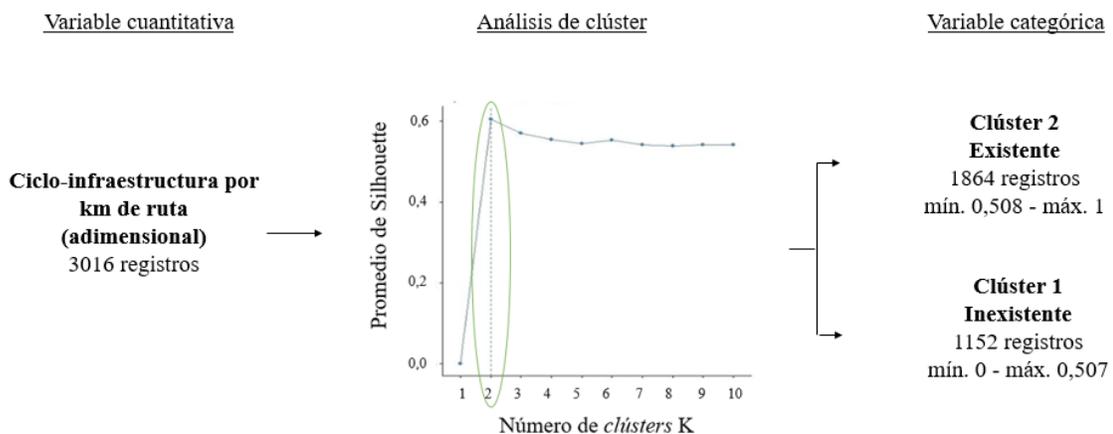
En el estudio mencionado, determinaron la variable cuantitativa “semáforos por km recorrido” para evaluar modelos en condiciones simuladas, donde el rango del número de semáforos estuvo entre 1 y 10 semáforos por km. Es decir, el doble de lo encontrado para este estudio en Bogotá, a partir de registros Biko, donde el máximo fue 5,42 semáforos por km recorrido. Sin embargo, no se encontraron referentes para la categorización de esta variable.

Por tanto, para denominar los dos grupos de esta variable, se tuvo en cuenta que el rango del clúster 2 incluye valores desde 0 hasta 1,54 semáforos/km por lo que es inviable denominar la agrupación como nulo y se decide denominarla en dos grupos: “mucho” y “poco”.

4.3.2 Ciclo-infraestructura por km de ruta

Con la función *k-means* y el gráfico de distancia promedio de *Silhouette*, en RStudio, se identifica que para la variable ciclo-infraestructura por km de ruta en la Figura 4-14, el valor predominante en las ordenadas es 0,61 para dos clústeres, donde el clúster 2 tiene el 61,8% de los registros y corresponde a ciclo-infraestructura existente; lo que sugiere que los ciclistas en Bogotá en su mayoría circulan por las vías con ciclo-infraestructura.

Figura 4-14 Categorización mediante análisis de clúster para ciclo-infraestructura por km de ruta



De acuerdo con lo revisado en la literatura, se encontró que hay una influencia positiva entre ciclo-infraestructura y los desplazamientos en bicicleta en 28 ciudades de Estados Unidos durante 2005-2017 (Yang, Cai, Feng, Zhengying y Timmermans, 2021), donde se analizaron km de ciclo-infraestructura por km² y km de ciclovías por cada 10.000 habitantes, pero sin categorización de variables.

Por otro lado, a partir de una revisión de redes de infraestructura para ciclistas (Buehler y Dill, 2016) se encontró que en un estudio realizado en Portland, Oregón (Broach, Dill y Gliebe, 2012) se rastrearon las rutas de los ciclistas con dispositivos GPS y se encontró que

alrededor del 50% de los kilómetros recorridos en bicicleta ocurrieron en vías sin ciclo-
infraestructura, comparado con lo encontrado con los registros de Biko en Bogotá, donde
cerca del 38% de las rutas (clúster 1-inexistente) se realiza en vías sin o con menos de 0,507
km de ciclo-*infraestructura*.

Finalmente, para la asignación de los nombres de ambos clústeres de la variable “km de
ciclo-*infraestructura*” y dada la inexistencia de referentes para su categorización, se
asumieron los términos “inexistente” y “existente” precisados con su respectiva cantidad de
registros en la Figura 4-14.

4.4 Categorización definitiva de las variables para MCA

De acuerdo con lo precisado en las secciones 4.1, 4.2 y 4.3, en la Tabla 4-2 se resume la
categorización de las variables mediante análisis de clúster que será el insumo para el MCA.
en el capítulo 5, inicialmente para 8 variables, señalando que las variables días de la semana
y horario de inicio de ruta no requirieron este proceso para su categorización.

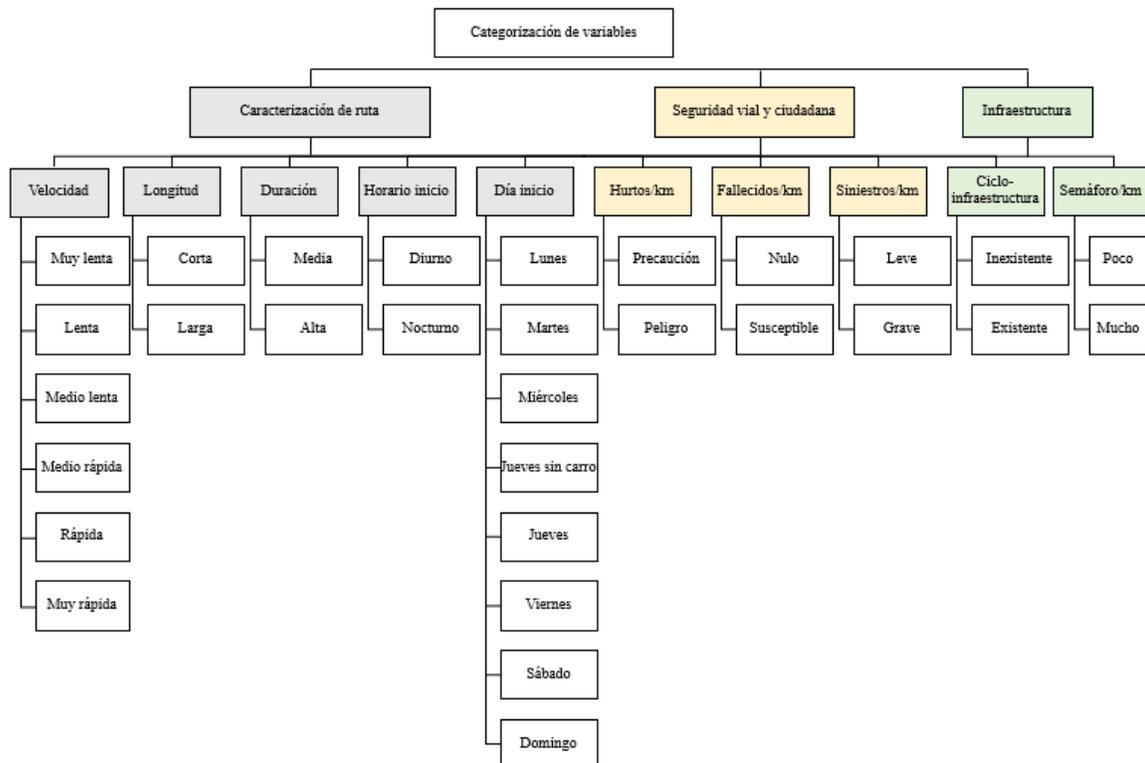
Tabla 4-2 Resumen de categorización de 8 variables mediante análisis de clúster

Variable cuantitativa (unidad de medida)	Construcción de variable categórica						
	Valor máximo en diagrama de <i>Silhouette</i>	Cantidad de clústeres	Número de clúster	Nombre del clúster	Registros por clúster	Valor Mínimo	Valor Máximo
Duración de ruta (h)	0,78	2	1	Duración media	2857	0,04	1,53
			2	Duración alta	159	1,53	7,30
Velocidad promedio de ruta (km/h)	0,54	6	1	Muy lenta	384	5,37	9,56
			2	Lenta	722	9,57	12,93
			3	Medio lenta	942	12,94	16,07
			4	Medio rápida	679	16,08	19,99
			5	Rápida	274	20,02	28,93
			6	Muy rápida	15	29,9	48,46
Longitud de ruta (km)	0,59	2	1	Longitud corta	2350	0,56	13,4
			2	Longitud larga	666	13,43	108,5

Siniestros por km de ruta (siniestros/km)	0,59	2	1	Leve	2087	0	10,18
			2	Grave	929	10,19	116,03
Fallecidos por km de ruta (fallecidos/km)	0,64	2	1	Nulo	2384	0	0,67
			2	Susceptible	632	0,67	7,63
Hurto por km de ruta (hurto/km)	0,95	2	1	Precaución	2897	0	39,38
			2	Peligro	119	39,63	403,7
Semáforos por km de ruta (semáforos/km)	0,67	2	1	Poco	2447	0	1,54
			2	Mucho	569	1,54	5,42
Ciclo-infraestructura por km de ruta (adimensional)	0,61	2	1	Existente	1864	0,51	1
			2	Inexistente	1152	0	0,51

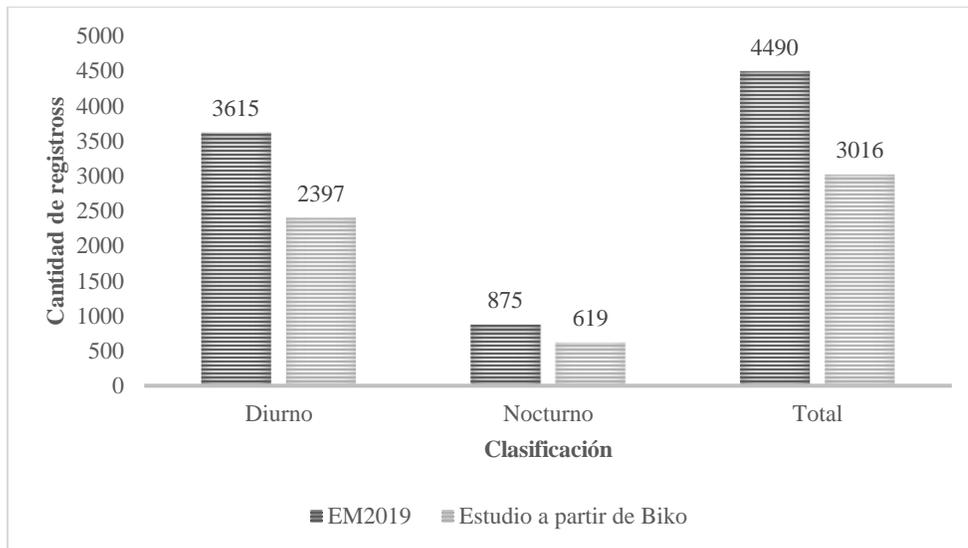
Por lo anterior, las diez variables categóricas con sus respectivas agrupaciones indicadas en la Figura 4-15 fueron usadas para transformar la base de datos cuantitativa, de cada ruta, y asignarle las categorías establecidas, para luego estudiarlas de manera multivariada mediante Análisis de Correspondencias Múltiples.

Figura 4-15 Resumen de categorización de 10 variables para MCA



Finalmente, de las 11 variables desarrolladas en este capítulo, solo las dos variables: “día de inicio de ruta” y “hora de inicio de ruta” son comparables entre este estudio y la EM2019. Sin embargo, “día de inicio de ruta” fue comparada en la Figura 3-30, por lo que en la Figura 4-16 se compara la variable “hora de inicio de ruta”.

Figura 4-16 Hora de inicio de ruta frente a la EM2019

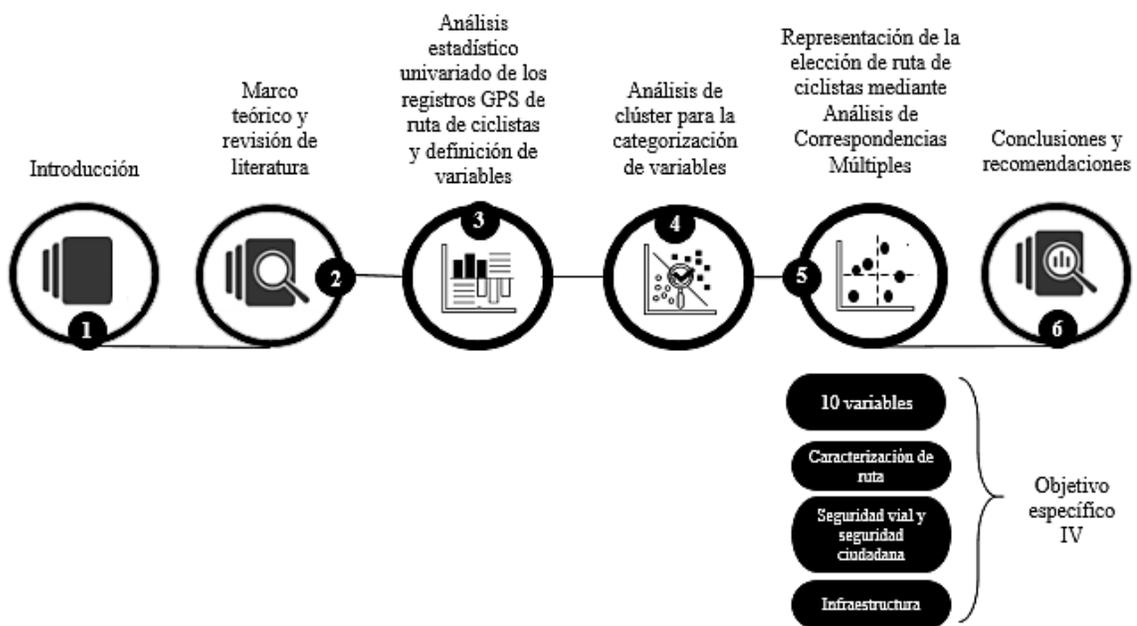


Por lo anterior, se evidencia que la proporción de los dos grupos (diurno y nocturno) para la variable “horario de inicio de ruta” se mantiene en ambos estudios y se confirma que en Bogotá la mayoría de los viajes en bicicleta inician en el horario diurno.

5 Representación de la elección de ruta de ciclistas mediante Análisis de Correspondencias Múltiple

Según el análisis de clúster para la caracterización de variables desarrollado en el capítulo 4 y para identificar los patrones de elección de ruta de ciclistas correspondiente al objetivo general de este estudio, este capítulo desarrolla el método MCA y su respectivo análisis en el marco del objetivo específico IV como se resume en la Figura 5-1.

Figura 5-1 Diagrama resumen del capítulo 5



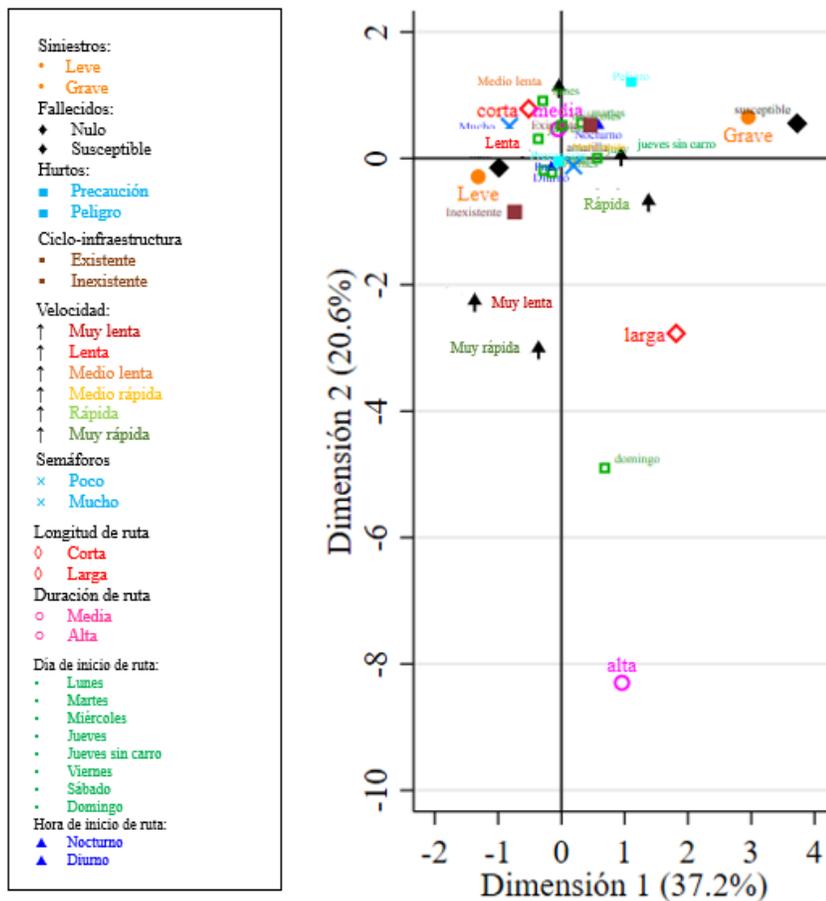
5.1 MCA para todas las variables y sus categorías

Para detallar el análisis multivariado se utilizó MCA en Stata mediante el comando *mcaplot* (Stata, 2021). Se debe tener en cuenta que la interpretación del mapa de correspondencias realizado implica revisar de la siguiente manera las relaciones de proximidad (Rojo, 2010):

- Proximidad entre individuos en términos de parecido: Dos individuos se parecen si tienen casi las mismas categorías.
- Proximidad entre categorías de variables diferentes en términos de asociación: Son cercanos ya que globalmente están presentes en los mismos registros de ruta.
- Proximidad entre categorías de una misma variable en términos de parecido: Son excluyentes por construcción, si son cercanas es porque los registros de ruta de ciclistas que las poseen presentan casi el mismo comportamiento en las otras variables.

Por tanto, el ejercicio inicial corresponde a representar en un mapa de MCA las 10 variables en el capítulo 4, cuyo resultado es presentado en la Figura 5-2.

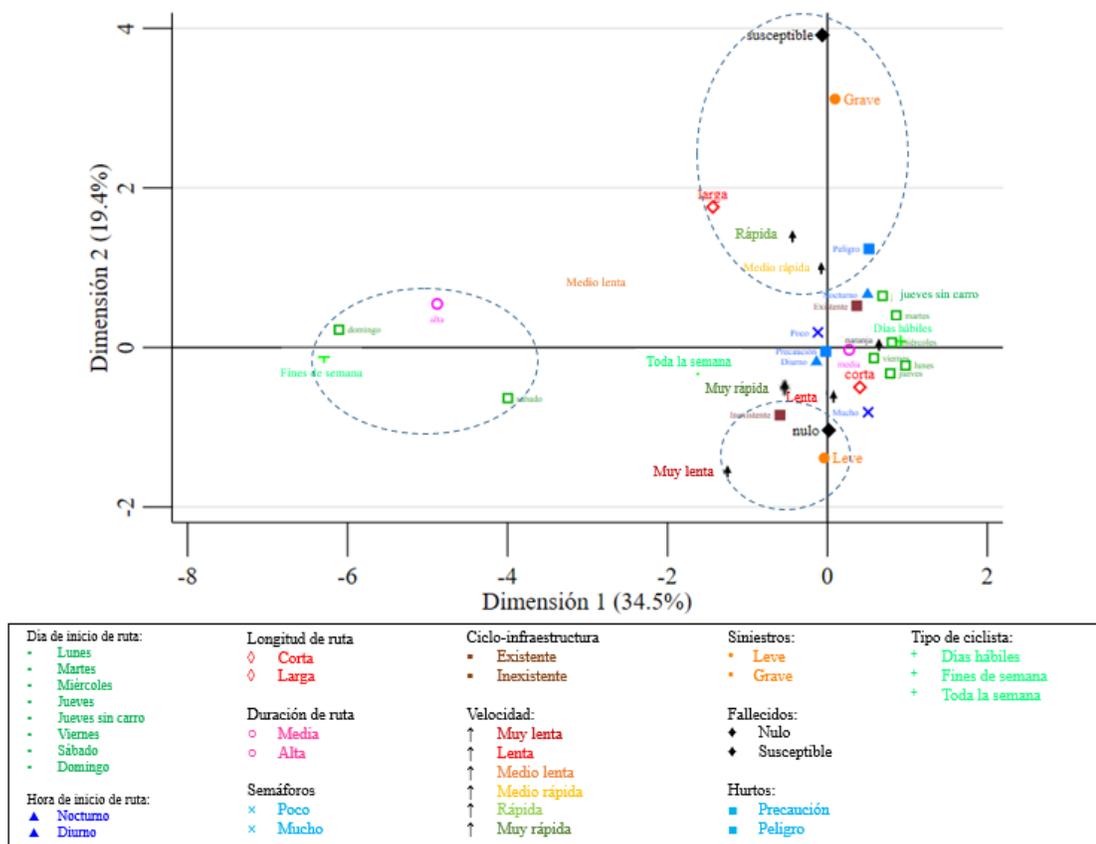
Figura 5-2 MCA para las 10 variables



En la Figura 5-2 las categorías de la variable “día de inicio de ruta” tienen proximidad con las categorías de las variables “hora de inicio de ruta”, “hurto” y “velocidad”, lo que hace necesario revisar el MCA con menos variables y así reconocer los posibles patrones de los ciclistas en las rutas registradas en Biko en Bogotá.

En complemento, la Figura 5-3 incluye la variable “tipo de ciclista” y se observa que disminuye el porcentaje de las inercias de ambas dimensiones, ya que se tiene una variable adicional, disminuyendo así la varianza acumulada por las dos dimensiones del mapa de correspondencias, pero facilitando la interpretación de este.

Figura 5-3 MCA para 11 variables



La Figura 5-3 también permite sugerir los siguientes patrones según proximidad entre categorías:

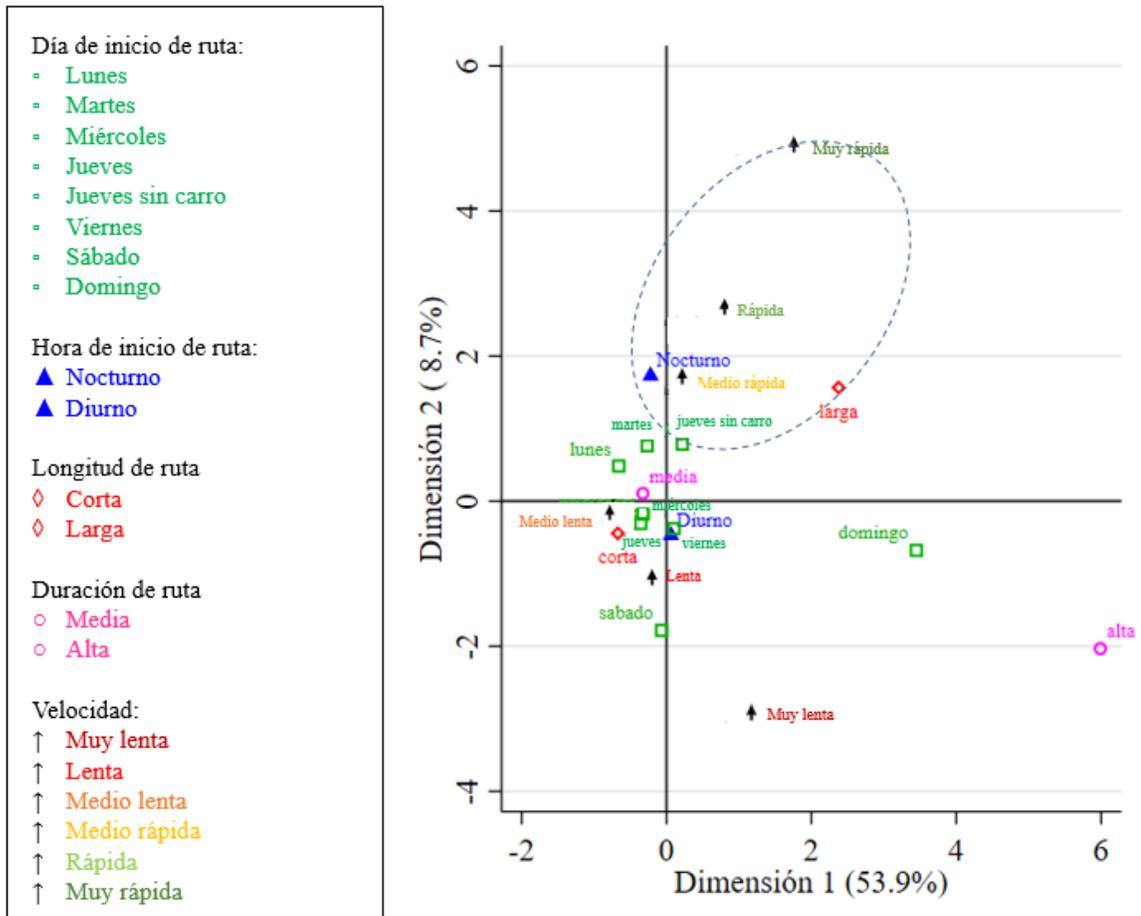
- Los ciclistas recreativos usualmente son los que hacen su ruta los fines de semana, durante sábados y domingos únicamente, y sus rutas se caracterizan por ser de alta duración. Lo anterior se concluye al observar las categorías “domingo” y “sábado” de la variable “día de inicio de ruta”, cercanas a la categoría “fines de semana” de la variable tipo de ciclista y con la categoría “alta” de la variable “duración de ruta”.
- La falta de infraestructura exclusiva para ciclistas, representa rutas realizadas a bajas velocidades, y tiende a mitigar su exposición al riesgo vial. Esto se concluye ya que la categoría “inexistente” de la variable “ciclo-infraestructura” con la categoría “muy lenta” de variable “velocidad” presenta proximidad con las categorías “leve” y “nulo” de las variables de “siniestros” y “fallecidos”.
- El MCA con 11 variables aporta evidencia frente a un resultado esperado de comportamiento del riesgo vial del ciclista. Esto es que, el ciclista en Bogotá entre más distancia recorre, mayor exposición al riesgo vial y al riesgo ciudadano presenta. Lo cual se concluye al observar que la categoría “larga” de la variable “longitud de ruta” está cercana a las categorías “rápida” y “medio rápida” de la variable “velocidad”. Además, existe una proximidad entre las categorías “susceptible”, “grave” y “peligro” de las variables “siniestros”, “fallecidos” y “hurtos”, respectivamente.

Estos patrones son detallados en las secciones 5.2, 5.3 y 5.4 con menos variables y agrupados según los enfoques de esta investigación, a saber: caracterización de ruta, seguridad vial y seguridad ciudadana, e infraestructura, respectivamente.

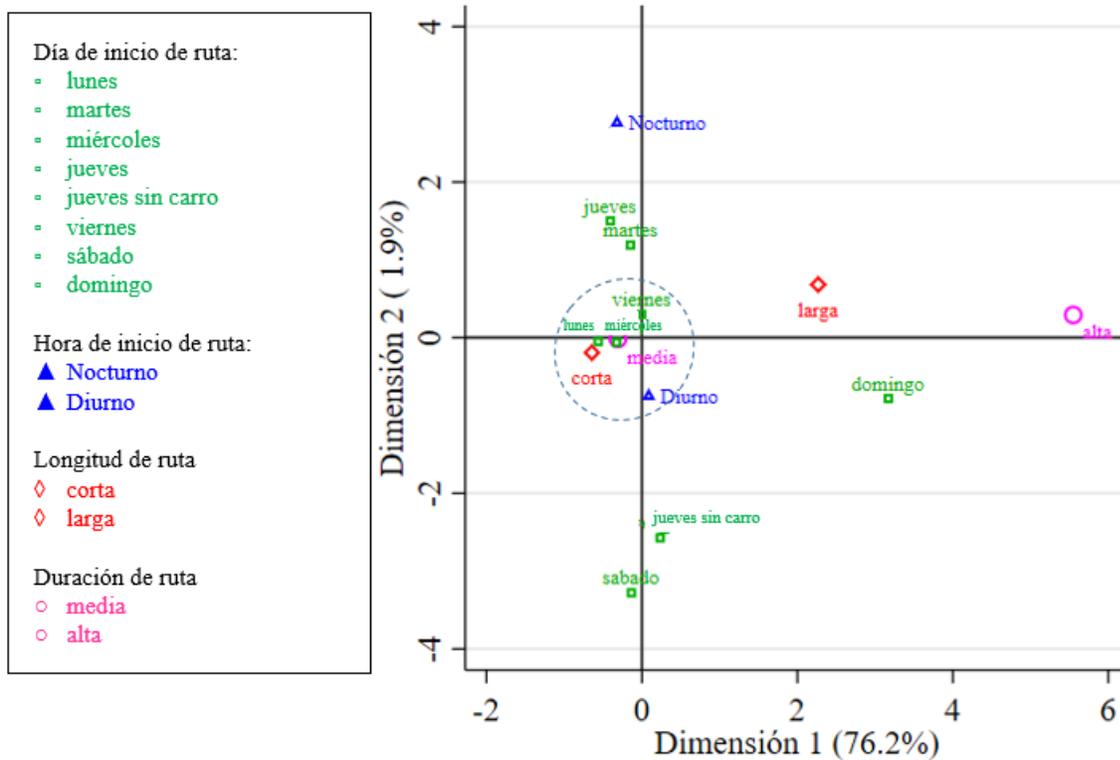
5.2 Caracterización de ruta

En esta sección, se precisan las variables de caracterización de ruta presentadas en la sección 4.1 (“día de inicio de ruta”, “hora de inicio de ruta”, “longitud de ruta” y “duración de ruta”) y, su respectivo análisis comparado con la variable “velocidad”. La Figura 5-4 sugiere que las rutas de longitud larga corresponden a las tres categorías de velocidad rápida y, posiblemente, se realicen en horario nocturno, los martes y el jueves día sin carro.

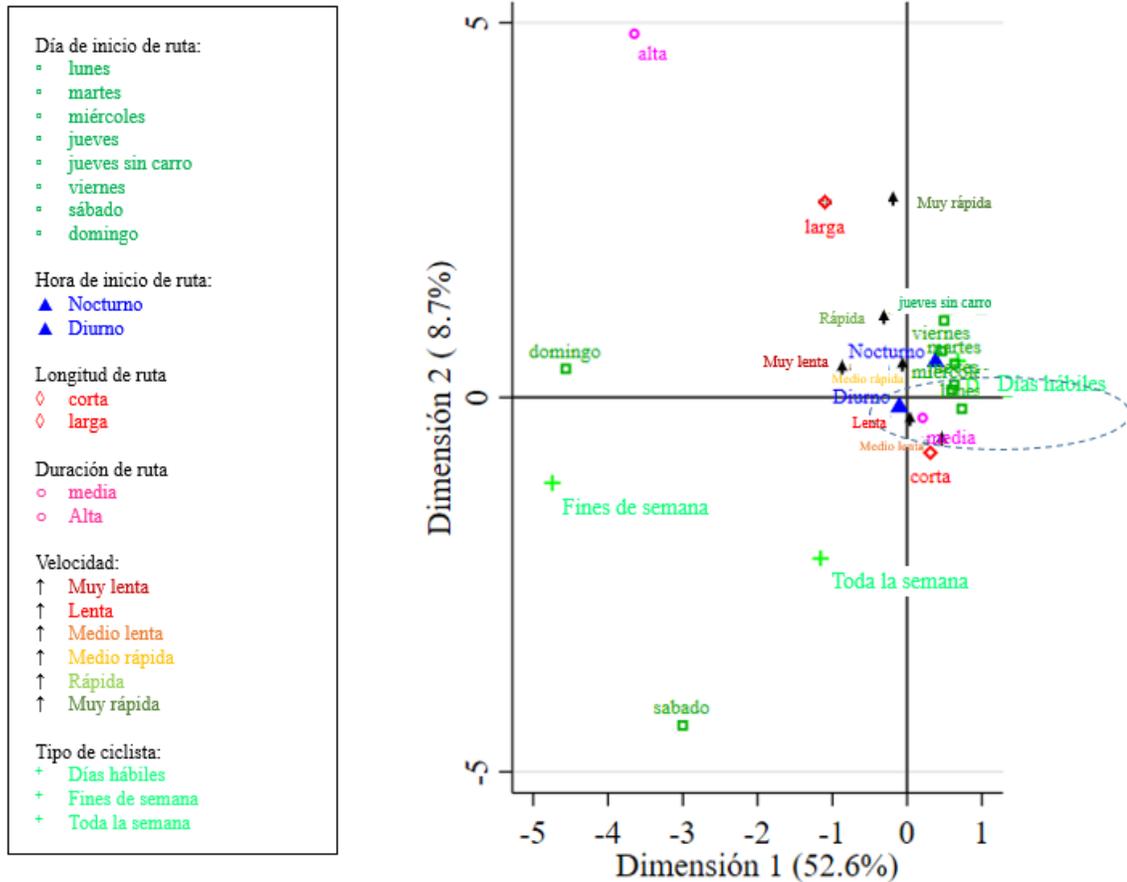
Figura 5-4 MCA para las variables de caracterización de ruta



Por otro lado, sin tener en cuenta la variable “velocidad”, en el enfoque de variables de caracterización de ruta, la Figura 5-5 sugiere, por proximidad entre categorías, que las rutas de longitud corta presentan una duración media y en horario diurno los lunes, miércoles y viernes, según los registros de rutas de ciclistas en Biko de febrero 2018, para Bogotá.

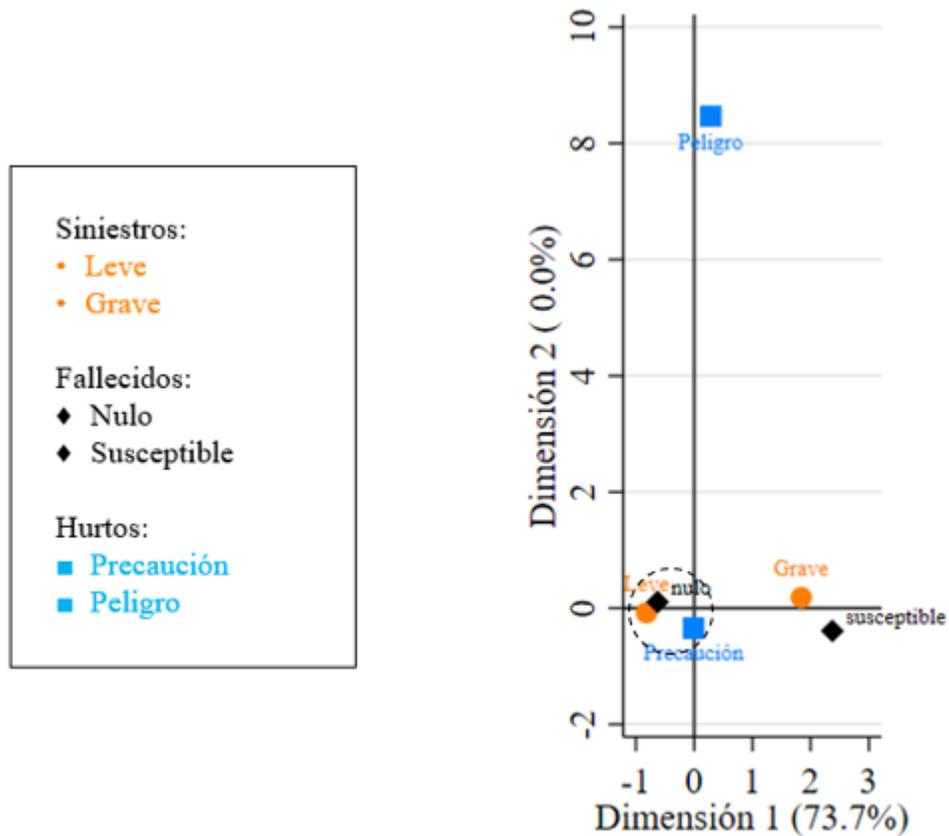
Figura 5-5 MCA para las categorías de caracterización de ruta sin variable velocidad

Finalmente, en la Figura 5-6 se identifica que la categoría “días hábiles” de la variable “tipo de ciclista” tiene una proximidad con “duración media”, “velocidad lenta” y “medio lenta”, “longitud corta” y “horario de ruta diurno”, lo que sugiere que los ciclistas urbanos, que viajan de día, suelen decidir usar la bicicleta en días hábiles para rutas cortas y velocidades lentas.

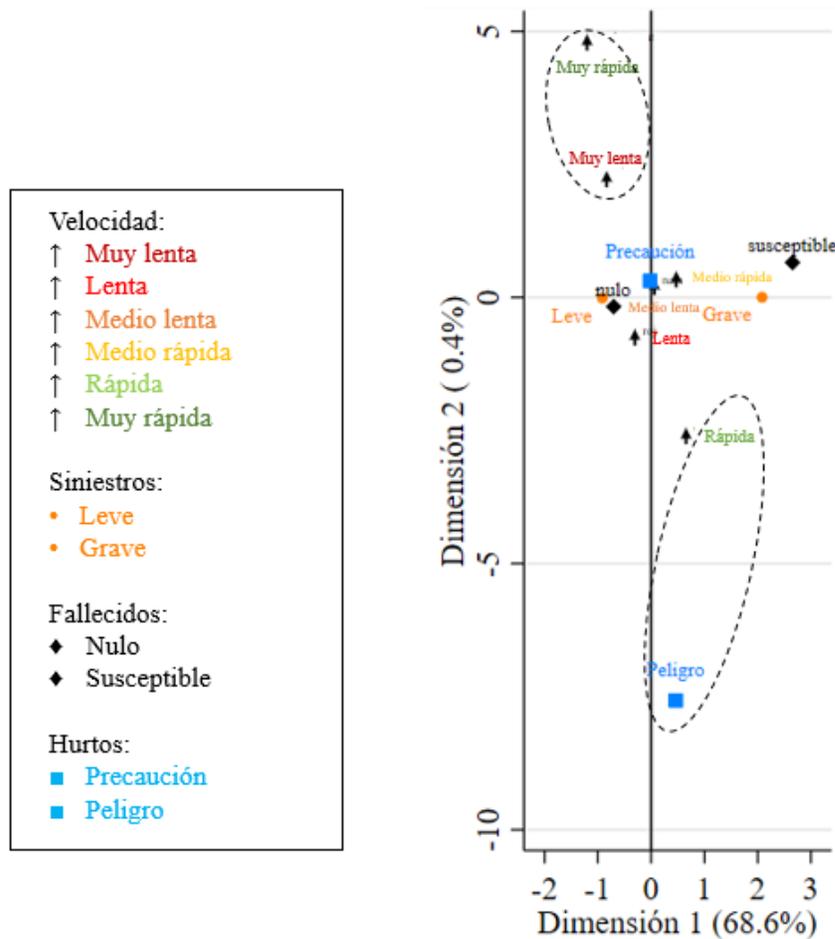
Figura 5-6 MCA para variables de caracterización de ruta incluyendo tipo de ciclista

5.3 Seguridad vial y seguridad ciudadana

Respecto al enfoque de seguridad, también se replica el ejercicio de MCA con las variables “velocidad” y “tipo de ciclista”. Inicialmente, la proximidad de las categorías de las variables de seguridad vial y ciudadana se presentan en la Figura 5-7. Este MCA precisa cercanía entre las categorías “leve” y “nulo”, además de una proximidad adicional con la categoría de menos registros o “precaución” en la variable “hurto”, lo que sugiere que las rutas de ciclistas donde hay seguridad vial tienden a ser las mismas rutas donde hay seguridad ciudadana.

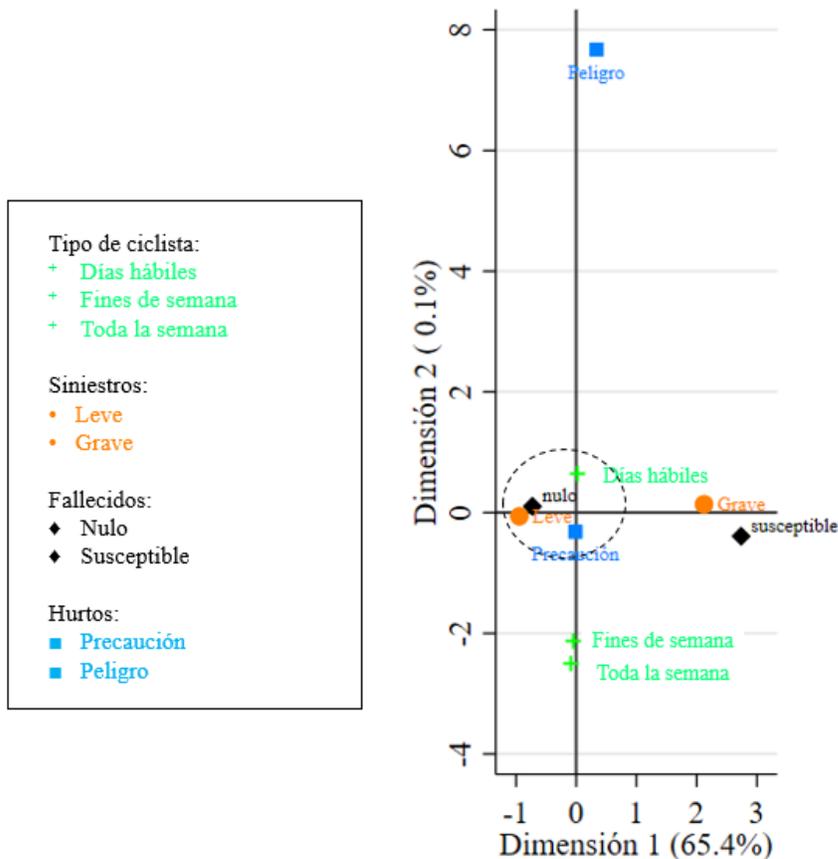
Figura 5-7 MCA para las variables de seguridad vial y ciudadana

En complemento, la Figura 5-8 presenta proximidad entre las categorías “peligro” y “rápida” lo que sugiere inicialmente que, a mayor velocidad de ruta, mayor posibilidad de hurto al ciclista. Sin embargo, para hacer esta afirmación, la categoría “muy rápida” debería presentarse en el mismo cuadrante del mapa de MCA y ocurre lo contrario e inclusive, la categoría “muy rápida” presenta proximidad con la categoría “muy lenta”. Lo que sugiere que la variable “velocidad” requiere de una muestra mayor a futuro o analizarla con otras variables.

Figura 5-8 MCA para las variables de seguridad vial y ciudadana con velocidad

Adicionalmente, la Figura 5-9 precisa un mapa MCA con las variables de seguridad y la variable “tipo de ciclista”, donde se identifica que las variables con sus respectivas categorías “fallecidos – nulo”, “siniestros – leve”, “hurtos – precaución” y “tipo de ciclista - días hábiles”, tienen una proximidad que sugiere que los ciclistas urbanos que solo viajan entre semana tienen los valores mínimos de riesgo vial e inseguridad ciudadana. Por otro lado, respecto a las ubicaciones extremas en el mapa MCA para las categorías “peligro”, “grave”, “susceptible” no hay proximidad que nos permita generar un patrón de relación con las categorías “fin de semana” y “toda la semana” de la variable “tipo de ciclista”.

Figura 5-9 MCA para las variables de seguridad vial y ciudadana con variable tipo de ciclista

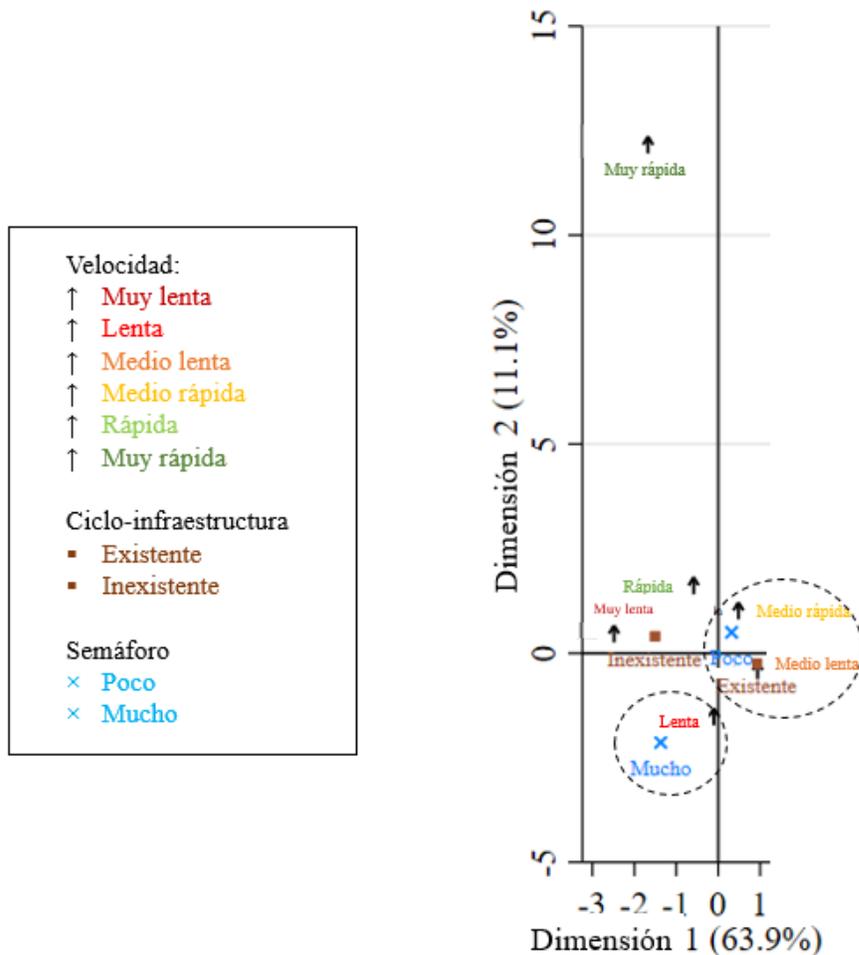


5.4 Infraestructura

Una vez realizado el MCA con las variables “semáforo” y “ciclo-infraestructura”, se identifica que estas dos variables se encuentran en la misma dimensión del mapa de correspondencias, por lo que es necesario incluir otra categoría de comparación ya que conceptualmente este método requiere que las categorías de las variables se encuentren como mínimo en dos dimensiones. Para lo anterior, se elige la variable “velocidad” por la relación que hay entre la semaforización para controlar el flujo vehicular y por la relación de velocidad con ciclo-infraestructura para dimensionar en cuáles velocidades de ruta los ciclistas usan o no este tipo de infraestructura.

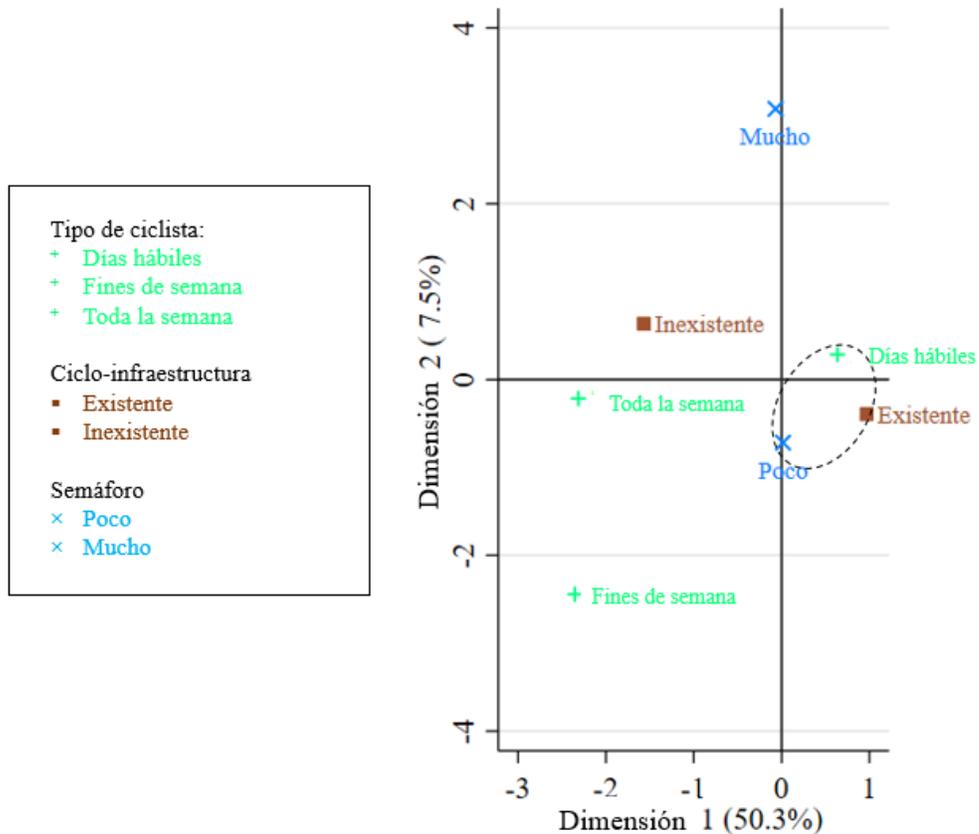
La Figura 5-10 precisa que las dos categorías medias de la variable “velocidad” sugieren un patrón según su proximidad con “poco-semáforo” y “ciclo-infraestructura-existente”. De nuevo, las categorías extremas de la variable “velocidad” presentan contradicciones. Es decir, que el balance de velocidad media, sugerida en las ciudades para todos los actores viales, se promueve con la construcción de ciclo-infraestructura y pocos semáforos que afecten a los ciclistas. En complemento, “velocidad-lenta” presenta proximidad con “poco-semáforo” que indica que las rutas ciclistas asociadas a las velocidades lentas son cercanas a muchas intersecciones semaforizadas por km de ruta ciclista recorrida.

Figura 5-10 MCA para las variables de infraestructura con variable velocidad



Adicionalmente, la Figura 5-11 sugiere un único patrón, según proximidad, que consiste en que los ciclistas de días hábiles tienden a recorrer su ruta con ciclo-infraestructura existente y con pocos semáforos.

Figura 5-11 MCA para las variables infraestructura con variable tipo de ciclista



5.5 Discusión de resultados frente a otros estudios

En esta sección se precisan dos diagramas de MCA complementarios, que son comparados con estudios realizados en Copenhague, Nueva York y Bogotá.

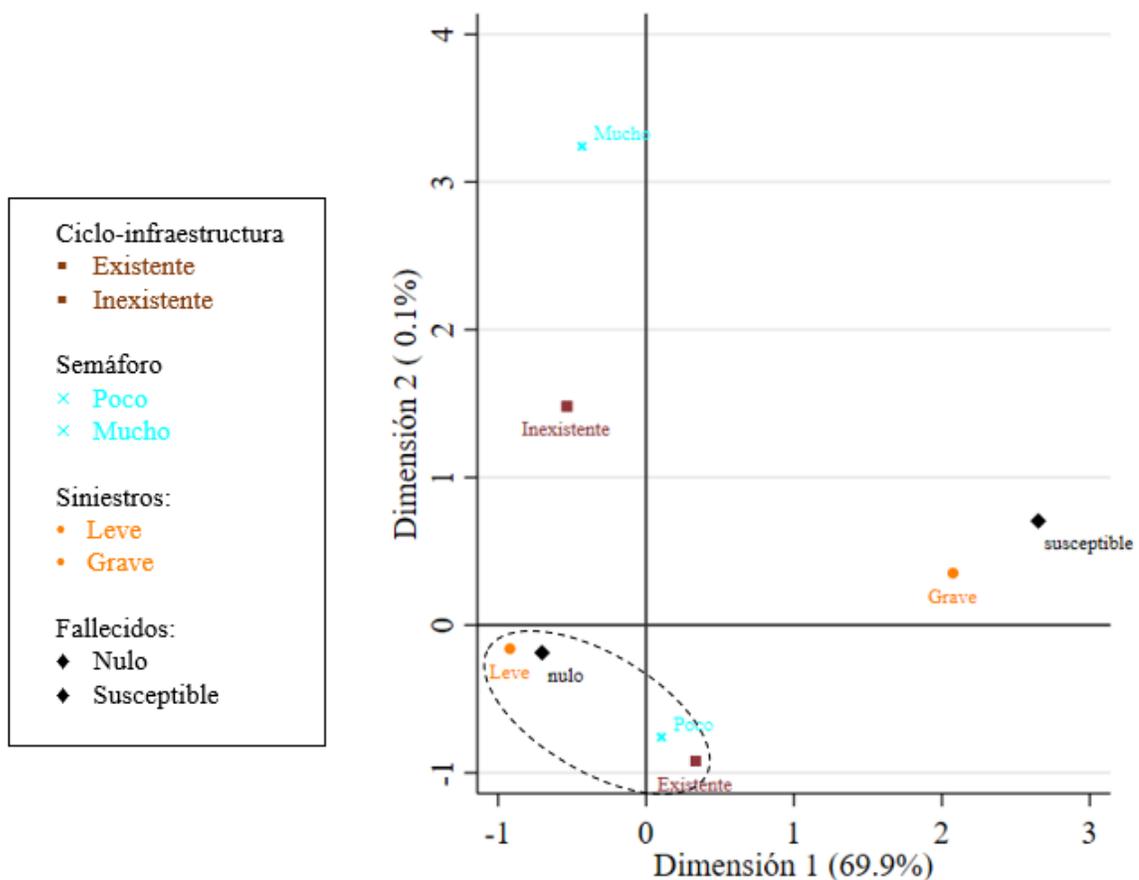
5.5.1 Seguridad vial y ciclo-infraestructura en intersecciones

Teniendo en cuenta que, según un estudio de Copenhague donde analizaron el impacto de siniestros y fallecidos antes y después de construir ciclo-infraestructura (Underlien Jensen., 2007), se concluyó que la construcción de carriles para bicicletas ha dado como resultado

una leve disminución en el número de choques y siniestros en las vías e intersecciones en un rango de 10 a 4 por ciento, respectivamente.

Para comparar los resultados de este estudio frente a lo encontrado en Copenhague, se realizó un mapa de MCA que relaciona las variables “siniestros”, “fallecidos”, “ciclo-infraestructura” y “semáforo” como se evidencia en la Figura 5-12.

Figura 5-12 MCA seguridad vial y ciclo-infraestructura en intersecciones



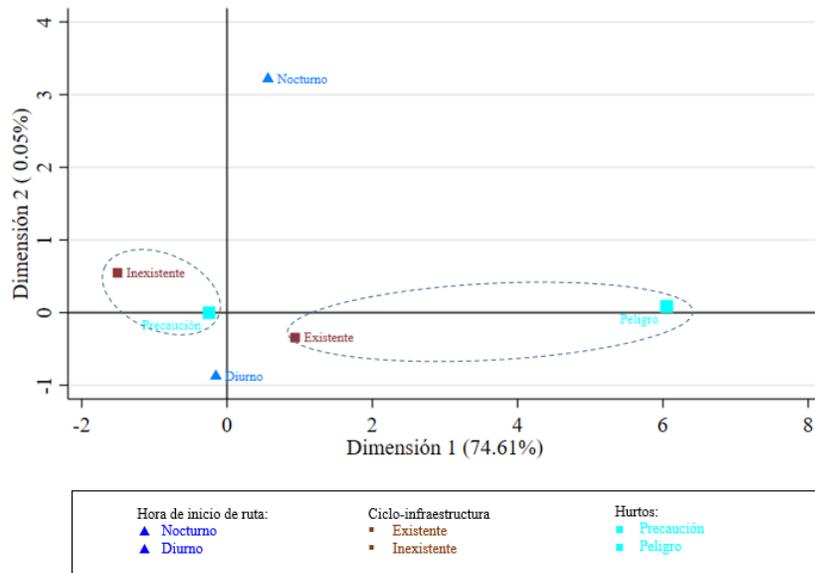
En efecto, al igual que el referente de Copenhague la categoría “existente” de ciclo-infraestructura presenta proximidad a las categorías “leve” y “nulo” de registros de siniestros y fallecidos, respectivamente, lo que sugiere que a mayor ciclo-infraestructura se mitiga el riesgo a hechos de inseguridad vial para ciclistas.

Por otro lado, para analizar intersecciones, se incluyó la variable “semáforo”, donde la categoría “poco” presenta la mayor proximidad, del mapa de MCA, con la categoría “existente” de ciclo-infraestructura. Lo que sugiere que donde hay ciclo-infraestructura hay pocos semáforos en Bogotá, es decir, que en las intersecciones semaforizadas de Bogotá falta ciclo-infraestructura (*box-bike*, semáforos para ciclistas, señalización) y esto podría, al igual que Copenhague, disminuir la inseguridad vial.

En complemento, la inclusión de ciclo-infraestructura en intersecciones también estaría en concordancia con el índice de Calles Sostenibles de 2011, publicado por el Departamento de Transporte de la Ciudad de Nueva York (Bushell, Poole, Zegeer y Rodriguez, 2013), el cual encontró que las mejoras, tales como islas para peatones y carriles para bicicletas, cercanas a intersecciones condujeron a una reducción general de choques de automovilistas, así como siniestros de ciclistas, una disminución en el exceso de velocidad y un aumento en peatones y actividades en bicicleta.

5.5.2 Hurtos a ciclistas, hora de ruta y ciclo-infraestructura

De acuerdo con lo identificado en la sección 3.3, la variable “hurtos” de seguridad ciudadana presenta su registro más alto cuatro veces mayor por km de ruta recorrida comparado con la variable “siniestros” de seguridad vial. La variable “hurtos” de seguridad vial se convierte en el eje primordial para política pública, razón por la que en la Figura 5-13 se precisan, en un mapa de MCA, las variables hurtos, ciclo-infraestructura y hora de ruta.

Figura 5-13 MCA hurtos, hora de ruta y ciclo-infraestructura

Así mismo, para el caso de Bogotá, se encontró un antecedente de revisión de robos para ciclistas y su relación con la ciclo-infraestructura (Márquez y Soto, 2021), a partir de 300 encuestas con simulación de escenarios a finales de octubre de 2018, en la que se identificó que cuanto mayor sea la preocupación por la seguridad en los ciclistas, menor será la utilidad de los carriles para bicicletas. Esto último es lo que sugiere la Figura 5-13, donde la ciclo-infraestructura para ciclistas y su uso está asociado por proximidad a la categoría “peligro”, así como una cercanía entre la categoría “precaución” de menos registros de hurtos con ciclo-infraestructura “inexistente”. Además, se sugiere que la hora de inicio de ruta, diurno o nocturno no tiene una relación con la variable hurtos en Bogotá

6 Conclusiones y recomendaciones

El principal aporte de este trabajo de grado es el procedimiento respaldado con una serie de métodos para analizar ciclistas y las variables que influyen en su decisión de ruta, ya que podría ser aplicado en otra ciudad, o en Bogotá, con datos más recientes de aplicaciones móviles. Esto para orientar la toma de decisiones de política pública de acuerdo a la disponibilidad de información y adaptación de las variables de acuerdo al contexto de cada ciudad.

Por tanto, este estudio responde a ¿cuáles son los factores que influyen en la decisión de ruta de los ciclistas en Bogotá? para esto, se utilizó estadística descriptiva, mediante análisis univariado, y Análisis de Correspondencias Múltiples, bajo un enfoque multivariado; en ambos casos, se estableció un método articulado de depuración de registros de aplicaciones móviles (RStudio), con manejo estadístico de bases de datos de entidades públicas (Stata) y el componente geográfico (QGIS y ArcGIS).

Así mismo, este capítulo precisa las conclusiones y recomendaciones en tres enfoques: general, pregunta de investigación e hipótesis y contribuciones al estado del conocimiento.

6.1 Generales

Esta investigación tiene una estructura que permite abordar con suficiencia los cinco objetivos específicos planteados en la sección 1.4, e incluye cinco capítulos previos a este, congruentes con la metodología planteada, articulados entre sí: 1. Introducción, 2. Marco teórico y revisión de literatura, 3. Análisis estadístico de los registros GPS de ruta de ciclistas y definición de variables, 4. Análisis de clúster para la categorización de variables, y 5. Representación de la elección de ruta de ciclistas mediante Análisis de Correspondencias Múltiples.

Según la EM2019, se realizan 880.367 viajes al día en bicicleta en Bogotá, representando el 6,6% de viajes en el reparto modal, según la Figura 1-1. Por otro lado, de acuerdo con los anuarios de seguridad vial, de 2017 a 2019, mientras los fallecidos por siniestros viales del

total de actores viales han disminuido cada año, los ciclistas fallecidos por siniestralidad vial han aumentado, como se muestra en la Figura 1-2. Además, Bogotá tiene 572 km de ciclo-
infraestructura hasta marzo 2021. Lo anterior, permite reconocer que en Bogotá se requiere estudiar a los ciclistas por medio de investigaciones sobre normativa, política pública, manuales técnicos y consultoría, enfocadas en seguridad vial, ciudadana y ciclo-
infraestructura, con el propósito de generar un conocimiento integral tanto de su decisión de ruta, como de las problemáticas asociadas a dicha decisión, de manera que los recursos se destinen asertivamente y esto se refleje en los indicadores de movilidad y seguridad.

Aunque la encuesta es uno de los métodos más aceptados en la academia y en la práctica para analizar el perfil ciclista, los patrones de elección de ruta y los indicadores para políticas públicas, para promover el uso de la bicicleta, requieren de monitoreo continuo geoespacial, precisamente, por la flexibilidad de ruta que ofrece este medio de transporte. Por estas razones, el análisis estadístico univariado y multivariado, a partir del aprovechamiento de registros de aplicaciones móviles, es un método explorado con recurrencia desde el año 2010, a nivel internacional, que pretende generar un panorama con más argumentos cuantitativos para tomar decisiones de política pública con un enfoque que no se limite a la percepción y memoria del encuestado.

El potencial del análisis de las bases de datos geoespaciales depende de la depuración y articulación con bases de datos complementarias. Esta investigación es pionera en articular seguridad ciudadana, seguridad vial, infraestructura y caracterización de ruta, en Colombia, donde siete, de las 12 variables cuantitativas, están parametrizadas por km de ruta recorrida para lograr comparaciones de magnitud y recurrencia. En complemento, el análisis univariado permitió identificar: [i] la variable hurtos a ciclistas como de mayor relevancia, [ii] los valores atípicos, el comportamiento de cada variable y a la vez generar y comparar el perfil horario, según esta investigación, con la EM2019 y con referentes internacionales, [iii] el panorama geográfico de los pares Origen-Destino a nivel de UTAM de ciclistas, según los registros procesados de la aplicación de Biko frente a los registrados en la

EM2019, y [iv] comparar en tiempo, contexto territorial, calidad y cobertura ambos resultados mediante mapas.

El análisis multivariado mediante MCA requiere variables categóricas; para esto las 12 variables cuantitativas se examinaron con ayuda de la herramienta RStudio, mediante análisis de clúster por *kmeans*, para garantizar que las agrupaciones de cada categoría correspondieran a un argumento estadístico de los registros a través del análisis del diagrama de *Silhouette*, a excepción de la variable “día de inicio de ruta” que ya es categórica; las variables de origen geográfico (Origen y Destino con desagregación por UTAM, longitud de ruta recta y sinuosidad) tampoco se tuvieron en cuenta para este ejercicio. Como resultado, ocho de las 10 variables tienen dos agrupaciones (también llamadas categorías), excepto “velocidad” con seis agrupaciones y “día de inicio de ruta” con los siete días de la semana más día sin carro.

Posteriormente, con las 10 variables más una variable adicional, que permitió clasificar al ciclista, se generaron mediante Stata los mapas de correspondencias del Análisis de Correspondencias Múltiples, en los que se identificó que la “velocidad” y “tipo de ciclista” son variables transversales al enfoque de caracterización de ruta, seguridad vial y ciudadana e infraestructura, donde los patrones encontrados son:

- Las rutas de longitud larga corresponden a las tres categorías de mayor velocidad y, posiblemente, se realicen en hora nocturna los martes y el jueves día sin carro. Esto podría aplicarse en política pública en circuitos de rutas ciclistas promovidos por la Alcaldía los martes en horario nocturno, con longitudes largas en la cicloinfraestructura con menor cantidad de semáforos posible con un enfoque recreativo y deportivo, específicamente.
- Las rutas de longitud corta presentan una duración media y en horario diurno, los lunes, miércoles y viernes. Lo que sugiere incentivar estrategias de circuitos cortos para ciclistas (rutas vigiladas y promovidas por la Alcaldía), los lunes, miércoles y viernes entre las UTAM de mayor Origen-Destino de rutas ciclistas cortas, que son: 97 Chico-Lago y 99 Chapinero; entre otros precisados en la sección 3.2.7.

- Las rutas con duración media, velocidad lenta y medio lenta, longitud corta y horario de ruta diurno sugieren que los ciclistas urbanos que viajan de día suelen decidir usar la bicicleta en días hábiles para rutas cortas y velocidades lentas. Esto podría usarse en políticas públicas generando zonas calmadas y calles completas que mejoren la percepción de comodidad de los ciclistas, tal como lo sugieren los cinco principios de diseño de infraestructura ciclista del manual CROW de países bajos y adoptado por la Unión Europea.
- La variable hurtos a ciclistas en categoría “peligro” presenta más proximidad con los registros de ruta sobre ciclo-infraestructura “existente”, lo que plantea una priorización de política pública donde construir ciclo-infraestructura puede ser ineficiente si sobre estas áreas no se plantea un contexto seguro para el ciclista. Ya que para el ciclista prevalece su seguridad ciudadana sobre la seguridad vial (Figura 5-13).
- El horario de inicio de ruta en sus categorías “diurno” y “nocturno” no representa ninguna relación con el uso de ciclo-infraestructura ni con la variable hurtos a ciclistas.
- Las rutas ciclistas que incluyen pocos semáforos y ciclo-infraestructura existente son aquellas que evidencian mayor proximidad con las categorías de “nulo” para fallecidos y “leve” para siniestros, lo que sugiere que para aumentar la seguridad vial de los ciclistas se debería promover ciclo-infraestructura, pero con la menor cantidad de semáforos posible o intervenir las intersecciones con un enfoque ciclista como lo sugiere el Departamento de Transporte de la Ciudad de Nueva York.

Si bien la información utilizada en este documento, proporcionada por Biko, corresponde a una muestra no aleatoria, se considera que los resultados no son influenciados por patrones estacionales de los viajes de los ciclistas, como lo confirma la validación frente a la EM2019 presentada en la sección 3.5

6.2 Preguntas de investigación e hipótesis

Respecto a la pregunta de investigación ¿cuáles son los factores que influyen la decisión de ruta de los ciclistas en Bogotá?, se estableció en la definición de la investigación que hay tres enfoques complementarios para la decisión de ruta: caracterización de ruta, seguridad vial y ciudadana, e infraestructura.

Además, específicamente, la velocidad es la variable que mayor análisis requiere por la complejidad de sus registros o patrones contradictorios en el MCA; así como el análisis univariado mediante diagrama de cajas y bigotes y registros atípicos de la variable hurtos/km que superan los de seguridad vial, incluso cuatro veces más para datos atípicos. Es decir, para mejorar y promover las rutas de ciclistas en Bogotá debería enfocarse en mitigar los efectos de la variable “hurtos” específicamente en las zonas con ciclo-infraestructura, seguido de monitorear y promover velocidades medias en bicicleta.

En complemento, con relación a las tres hipótesis planteadas, revisadas implícitamente en todo el documento desde la revisión de literatura hasta la aplicación de análisis estadístico univariado y multivariado, específicamente en la sección 5.5 mediante MCA, sección 2.1. según la revisión de antecedentes en análisis geográfico, sección 3.1. de acuerdo a la construcción de bases de datos geoespaciales y la sección 3.5 con la discusión de resultados frente a la EM2019, se presentan las siguientes conclusiones:

- Los ciclistas tienen en cuenta variables de seguridad vial y ciclo-infraestructura para decidir su ruta: Sí, se encontró que, aunque los ciclistas sí tienen en cuenta la ciclo-infraestructura y seguridad vial, en términos de seguridad para la decisión de ruta reconocen más la seguridad ciudadana, de acuerdo con lo discutido en el MCA de la sección 5.5.2 donde el ciclista tiende a evitar el “peligro” de hurto, incluso si esto sacrifica el uso de la ciclo-infraestructura
- Los registros GPS de ruta de ciclistas, junto con bases de datos geoespaciales, permiten identificar patrones de decisión de ruta de ciclistas: Sí, el potencial en tiempo de toma de información, calidad y aprovechamiento de los registros GPS mediante análisis univariado y multivariado permiten incluso tener un perfil ciclista; así como se identificó en la sección 2.1 donde, desde el año 2010, investigaciones en

ciclistas en países europeos presentan un enfoque de manejo de información geográfica. En congruencia con lo anterior, la creación de la base multivariada de este estudio solo pudo ser posible, con detalle de ruta, a partir de la articulación con otras bases de datos geográficas, como se precisa en la sección 3.1.

- Los métodos cuantitativos y estadísticos, a partir de aplicaciones móviles, podrían reemplazar las encuestas para analizar las necesidades del ciclista: Sí, una vez realizada la comparación frente a la EM2019, desde el análisis univariado, se identificó que la EM2019 respecto a la información para analizar a ciclistas es limitada, demorada en la toma de información y limitada respecto a caracterización de ruta. La metodología del presente estudio permite, además, una articulación con otras bases de datos geoespaciales, tal como se discutió en la sección 3.5, donde se comparó este estudio frente a la EM-2019.

6.3 Contribuciones al estado del conocimiento

En primer lugar, parte de esta investigación fue ganadora de la convocatoria tipo póster para el Primer Congreso Internacional 50/50 ¡Más mujeres en bici! llevado a cabo el 26 y 29 de septiembre de 2019 en Bogotá (Secretaría Distrital de la Mujer, 2019), donde la discusión se complementó con los otros proyectos ganadores y los aportes de los asistentes; las jurados fueron tres integrantes de la red Mujeres en Movimiento, *Women in motion*: Laura Ballesteros, activista mexicana, reguladora y experta en movilidad y políticas públicas; Liza Castillo, arquitecta costarricense, Ex Viceministra de transportes y seguridad Vial de Costa Rica y Paola Tapia Salas, Ex Ministra de Transportes y Telecomunicaciones de Chile, quienes evaluaron impacto, innovación, hoja de ruta y sostenibilidad de los proyectos presentados (Secretaría Distrital de Movilidad, 2019).

Por otro lado, el método usado en este estudio tiene el soporte teórico y práctico para ser replicado con una muestra de información mayor, así como las conclusiones específicas de cada capítulo permitirán a los tomadores de decisiones de políticas públicas priorizar variables para los ciclistas e identificar horarios, zonas y días en Bogotá para implementar

las mencionadas medidas, o en otras ciudades de acuerdo con la información que se disponga para replicar la aproximación metodológica aplicada en esta investigación.

Los capítulos 1 y 2 corresponden a un compendio de antecedentes y referentes, consolidando un panorama transversal de investigación, normativa, política pública, manuales técnicos y consultoría, pionero en Colombia, respecto a ciclistas.

El capítulo 3 dimensiona el comportamiento y complejidad de las variables y presenta una comparación frente al método tradicional EM2019.

El capítulo 4 contribuye a la creación de cada categoría a partir de referentes internacionales y de condiciones únicas como las encontradas en los registros en Bogotá, soportado en agrupaciones mediante métodos estadísticos, siendo un punto de partida para la categorización de variables de ciclistas y susceptible de ser promovido para el análisis de otros medios de transporte.

El capítulo 5, en línea con los análisis europeos y estadounidenses, identifica patrones mediante MCA para 11 variables de seguridad vial, ciudadana, infraestructura y caracterización de ruta.

Finalmente, además de llevar a cabo las recomendaciones prácticas de política pública identificadas para mejorar las rutas de los ciclistas en este documento, se sugiere replicar esta metodología en Bogotá con información más reciente y en otras ciudades con muestras de aplicaciones móviles e integrar variables relacionadas con:

- Ciclo-infraestructura cercana a carriles exclusivos, paraderos y estaciones de transporte público.
- Ciclo-infraestructura al interior de parques o establecimientos privados.
- Ciclo-parqueaderos.
- La ubicación de los ciclistas que registran su bicicleta en el proyecto “Registro-Bici” para el caso de Bogotá o su homólogo en otras ciudades.
- Fomentar el uso de encuestas dentro de la aplicación móvil con variables de caracterización de usuario como género si así se prefiere.
- Señalización para ciclistas.

- Ubicación de puntos de venta de bicicletas o comercio para ciclistas.

Así mismo, este documento podría adaptarse para análisis comparativos:

- Al replicar esta metodología con información de ciclistas que usan bicicletas compartidas y precisar una comparación entre el uso de la bicicleta privada y compartida.
- Al adaptar esta metodología para optimizar los patrones de viaje de ciclistas domiciliarios y sus condiciones de seguridad vial y ciudadana.
- Revisar opciones de profundizar la relación de causalidad entre variables.

7 Referencias

- Abdi, H., y Valentin, D. (2015). Obtenido de Multiple Correspondence Analysis: <https://www.researchgate.net/publication/239542271>
- Alcaldía de Bucaramanga. (2018). *www.bucaramanga.gov.co*. Obtenido de Estrategia de la bicicleta: <https://www.bucaramanga.gov.co/la-ruta/asi-se-creo-la-estrategia-de-la-bicicleta/>
- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2019). *Libro Bogotá Capital Mundial de la Bici*. Bogotá: Secretaría Distrital de Movilidad.
- Alves Peixoto, D. (1 de Noviembre de 2013). *Mining Trajectory Data*. Obtenido de Australian National University ANU: http://courses.cecs.anu.edu.au/courses/CSPROJECTS/13S2/Reports/Alves_Peixoto_Douglas_Report.pdf
- Anagnostopoulos, T., Ferreira, D., Samodelkin, D., Ahmed, M., y Kostakos, V. (2016). Cyclist-aware traffic lights through distributed smartphone sensing. *Pervasive and Mobile Computing*, 22-36. doi:<https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2016.01.012>
- Balzarini, M., Bruno, C., Córdoba, M., y Teich, I. (2015). *Universidad Nacional de Cordoba, Argentina*. Obtenido de Herramientas en el Análisis Estadístico Multivariado: https://www.researchgate.net/profile/Monica-Balzarini/publication/286931204_Herramientas_en_el_Analisis_Estadistico_Multivariado/links/5670e57808ae0d8b0cc1001a/Herramientas-en-el-Analisis-Estadistico-Multivariado.pdf
- Beitel, D. (2021). *Methods for investigating bicycle traffic flow parameters and facility performance in urban environments*. Obtenido de McGill University: <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/ns064b412>
- Berma, P., López, J., y Pardo, C. (2014). *Bicycle account*. Bogotá, Colombia: Despacio. Obtenido de <https://www.despacio.org/portfolio/bogota-bicycle-account-2014/>

-
- Bernardi, S., La Paix, L., y Geurs, K. (2018). Modelling route choice of Dutch cyclists using smartphone data. *The Journal of Transport and Land Use - JTLU, 11 Special Section: Velocity 2017*, 883-900. doi:<https://doi.org/10.5198/jtlu.2018.1143>
- BIKO. (2018). *Biko app*. Obtenido de <https://bikoapp.com/>
- Billot-Grasset, A., Emmanuelle, A., y Hours, M. (2016). How cyclist behavior affects bicycle accident configurations? *Transportation Research Part F: Traffic Psychology & Behaviour*, 261-276. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.10.007>
- Blasius, J., y Greenacre, M. (2014). *Visualization and Verbalization of Data*. Boca Raton, Florida: Taylor y Francis Group. Obtenido de https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=yid=TtLMBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA165&dq=analysis+correspondence+multipleyots=Oz3oAPKRbt&sig=wVII7kqXcTsUQmyEo_ze6USLexUyredir_esc=y#v=onepage&qyf=false
- Boss, D., Nelson, T., Winters, M., y Ferster, C. (2018). Using crowdsourced data to monitor change in spatial patterns of bicycle ridership. *Journal of Transport y Health* 9, 226-233.
- Broach, J., Dill, J., y Gliebe, J. (2012). Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46, 1730-1740. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.07.005>
- Buehler, R., y Dill, J. (2016). Bikeway Networks: A Review of Effects on Cycling. *Transport Reviews*, 36, 9-27. doi:<https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1069908>
- Buehler, R., y Pucher, J. (2021). The growing gap in pedestrian and cyclist fatality rates between the United States and the United Kingdom, Germany, Denmark, and the Netherlands, 1990–2018. *Transport Reviews*, 48-72. doi:[10.1080/01441647.2020.1823521](https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1823521)

- Bushell, M. A., Poole, B. W., Zegeer, C. V., y Rodriguez, D. A. (2013). *A Resource for Researchers, Engineers, Planners, and the General Public*. UNC Highway Safety Research Center. Obtenido de https://www.pedbikeinfo.org/cms/downloads/Countermeasure%20Costs_Report_Nov2013.pdf
- Cabral, L., y Kim, A. (2020). An empirical reappraisal of the four types of cyclists. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 206-221. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.05.006>
- Casello, J., y Usyukov, V. (2014). Modeling Cyclists' Route Choice Based on GPS Data. *TRANSPORTATION RESEARCH RECORD*. (2430, 155-161).
- Casscetta, E. (2009). *Transportation Systems Analysis. Models and Applications*. Springer Second Edition.
- Carter, D., 2017. Road Safety Fundamentals, Road Safety Fundamentals. Washington, DC. doi: FHWA-SA-18-003
- Chen, C., Wang, H., Roll, J., Nordback, K., y Wang, Y. (2020). Using bicycle app data to develop Safety Performance Functions (SPFs) for bicyclists at intersections: A generic framework. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 1034-1052. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.12.034>
- Conrow, L., Wentz, E., Nelson, T., y Pettit, C. (2018). Comparing spatial patterns of crowdsourced and conventional bicycling datasets. *Applied Geography* 92, 21-30.
- Consultoría de Información Infometrika. (2016). *Modelo de asignación de transporte no motorizado: bicicleta*. Bogotá: Secretaría Distrital de Movilidad.
- CROW. (2011). *Manual de Diseño para el tráfico de bicicletas*.
- CROW. (2016). *Design manual for bicycle traffic*. Obtenido de <https://crowplatform.com/product/design-manual-for-bicycle-traffic/>

- Decreto 456 de Alcaldía Mayor de Bogotá. (6 de Agosto de 2018). *Alcaldía Mayor de Bogotá*. Obtenido de www.alcaldiabogota.gov.co/https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=80486ydt=S
- Deffner, J., Hefter, T., Rudolph, C., y Ziel, T. (2012). *Handbook on cycling inclusive planning and promotion. Capacity development material for the multiplier training within the mobile2020 project*. Frankfurt/Hamburg: Mobile2020 Unión Europea. Obtenido de https://ec.europa.eu/transport/sites/default/files/cycling-guidance/mobile_2020_more_biking_in_small_and_medium_sized_towns_of_central_and_eastern_europe_by_2020.pdf
- Despacio y JB Mobility. (2017). *Plan Estratégico para promover el uso de la bicicleta como transporte urbano en la Ciudad de Cartagena*. Cartagena: Findeter y Alcaldía de Cartagena.
- Digioia, J., Edison, K., Xu, Y., Rodgers, M., y Guensler, R. (2017). Safety impacts of bicycle infrastructure: A critical review. *Journal of Safety Research*, 105-119. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2017.02.015>
- Fachelli, S., y López-Roldán, P. (Agosto de 2015). *Seminario Universidad Autónoma de Barcelona - Universidad de Buenos Aires*. Obtenido de Análisis de Correspondencias: <https://pagines.uab.cat/plopez/sites/pagines.uab.cat.plopez/files/ACO-UBA.pdf>
- Fajardo-Hoyos, C., Muñoz-Pabón, L., León-Blanco, D., y Zemante-Chavez, A. (2019). Caracterización de la población ciclista de la ciudad de Popayán. *Papeles de Coyuntura*, 264-303. Obtenido de <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/9010>
- Félix, R., Moura, F., y Clifton, K. (2017). Typologies of Urban Cyclists. Review of Market Segmentation Methods for Planning Practice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 125-133. doi:<https://doi.org/10.3141/2662-14>

- Fraboni, F., Prati, G., Casu, G., de Angelis, M., y Pietrantoni, L. (2021). A cluster analysis of cyclists in Europe: common patterns, behaviours, and attitudes. *Transportation*. doi:<https://doi.org/10.1007/s11116-021-10187-3>
- Gadsby, A., Hagenzieker, M., y Watkins, K. (2021). An international comparison of the self-reported causes of cyclist stress using quasi-naturalistic cycling. *Journal of Transport Geography*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102932>
- Ghanayim, M., y Bekhor, S. (2018). Modelling bicycle route choice using data from a GPS-assisted household survey. *European Journal of Transport and Infrastructure Research EJTIR* 18(2), 158-177.
- Gorris, T. (2016). *DTV Capacity Building*. Obtenido de 5 design principles for successful bicycle infrastructure: <https://dtvcapacitybuilding.com/blog/5-design-principles-for-successful-bicycle-infrastructure/>
- Gössling, S. (2018). ICT and transport behavior: A conceptual review. *International Journal of Sustainable Transportation*, 12:3, 153-164.
- Grond, K. (2016). Route Choice Modeling of Cyclists in Toronto. Toronto, Canadá. Obtenido de https://pdfs.semanticscholar.org/519a/b213bf53c4f40b3d81e3fc9be9bb2cb84659.pdf?_ga=2.249508672.697693611.1567473642-71111947.1567473642
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. Ciudad de México: McGraw Hill Education.
- Higuera-Mendieta, D., Uriza, P., Cabrales, S., Medaglia, A., Guzmán, L., y Sarmiento, O. (2021). Is the built-environment at origin, on route, and at destination associated with bicycle commuting? A gender-informed approach. *Journal of Transport Geography*, 103-120. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.103120>
- Hoe, N., y Kaloustian, T. (2014). *Bike Sharing in Low-Income Communities: An Analysis of Focus Group Findings Fall 2014*. Philadelphia: Institute for Survey Research – Temple University.

-
- Hong, J., McArthur, D., y Stewart, J. (2020). Can providing safe cycling infrastructure encourage people to cycle more when it rains? The use of crowdsourced cycling data (Strava). *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 109-121. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.01.008>
- Hood, J., Sall, E., y Charlton, B. (2011 y publicación virtual 2013). A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California,. *ransportation Letters*, 3:1, 63-75.
- Huber, S., y Lißner, S. (2019). Disaggregation of aggregate GPS-based cycling data – How to enrich commercial cycling data sets for detailed cycling behaviour analysis. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9, 1-6. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trip.2019.100041>
- IDRD. (2019). *Instituto Distrital de Recreación y Deporte*. Obtenido de <https://www.idrd.gov.co/ciclovia-bogotana>
- Johnson, S., Sidebottom, A., y Thorpe, A. (2008). *Specific Guides Series Guide No. 53 Bicycle Theft*. Arizona State University. Obtenido de https://popcenter.asu.edu/sites/default/files/sites/default/files/problems/pdfs/bicycle_theft.pdf
- Kraus, S., y Koch, N. (2021). Provisional COVID-19 infrastructure induces large, rapid increases in cycling. (S. Hanson, Ed.) *PNAS Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1-6. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2024399118>
- Kumar Dey, B., Anowar, S., Eluru, N., y Hatzopoulou, M. (2018). Accommodating exogenous variable and decision rule heterogeneity in discrete choice models: Application to bicyclist route choice. *PLoS One* 13, 11.
- Lee, K., y Nese Sener, I. (2021). Strava Metro data for bicycle monitoring: a literature review. *Transport reviews*, 41, 27-47. doi:<https://doi.org/10.1080/01441647.2020.1798558>

- Ley 1811 del Congreso de Colombia. (21 de Octubre de 2016). *Presidencia de la República de Colombia*. Obtenido de <http://es.presidencia.gov.co/normativa/normativa/LEY%201811%20DEL%2021%20DE%20OCTUBRE%20DE%202016.pdf>
- Ley 769 de la República de Colombia. (6 de Agosto de 2002). *Régimen legal de Bogotá D.C.* Obtenido de <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=5557>
- Lin, Z., y Fan, W. (2020). Modeling bicycle volume using crowdsourced data from Strava smartphone application. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 9, 334-343. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2020.03.003>
- Lin, Z., y Wei, F. (2021). Exploring bicyclist injury severity in bicycle-vehicle crashes using latent class clustering analysis and partial proportional odds models. *Journal of Safety Research*, 101-1127. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.11.012>
- Lißner, S., Huber, S., Lindemann, P., Anke, J., y Francke, A. (Septiembre de 2020). GPS-data in bicycle planning: “Which cyclist leaves what kind of traces?” Results of a representative user study in Germany. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100192>
- Liu, G., Hahn, T., y Liu, C. (20 de 06 de 2021). *Bicycle Infrastructure Manuals*. Obtenido de Infra manuals: <https://bicycleinfrastructuremanuals.com/>
- Loidl, M., Wendel, R., y Zagel, B. (2015). Spatial analysis and modelling of bicycle accidents and safety threats. *International Cycling Safety Conference*, (págs. 1-13). Hanover, Alemania. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/283508848_Spatial_analysis_and_modelling_of_bicycle_accidents_and_safety_threats
- Manum, B., Arnesen, P., Nordstrom, T., y Gil, J. (2019). Improving GIS-based models for bicycling speed estimations. *Transportation Research Procedia*, 85-89. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.12.009>

-
- Márquez, L., y Soto, J. (2021). Integrating perceptions of safety and bicycle theft risk in the analysis of cycling infrastructure preferences. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 285-301. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.06.017>
- Menghini, C., Carrasco, C., Schüssler, N., y Axhausen, K. (2010). Route choice of cyclists in Zurich. *Transportation Research Part A* (44), 754-765.
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2016). *Guía de ciclo-infraestructura para ciudades colombianas*. Bogotá: C. Pardo y A. Sanz, .
- Molina-Gómez, F., Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., Sousa, F., y Bulla-Cruz, L. (2021). Defining the soil stratigraphy from seismic piezocone data: A clustering approach. *Engineering Geology*(287). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106111>
- Nabavi Niaki, M., Saunier, N., y Miranda-Moreno, L. (2018). Analysing cyclist behaviour at cycling facility discontinuities using video data. *Transactions on Transport Sciences ToTS Volume 9 Issue 1*, 3-17.
- NACTO. (2014). Obtenido de Urban Bikeway Design Guide: <https://nacto.org/publication/urban-bikeway-design-guide/>
- Neira Medina, A. M. (2015). *Análisis del comportamiento de los ciclistas de Bogotá y su relación con la accidentalidad*. Obtenido de Universidad de los Andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13198>
- Nolan, J., Sinclair, J., y Savage, J. (2021). Are bicycle lanes effective? The relationship between passing distance and road characteristics. *Accident Analysis y Prevention*, 159. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106184>
- Orellana, D., Hermida, C., y Osorio, P. (2017). Comprendiendo los patrones de movilidad de ciclistas y peatones. Una síntesis de literatura. *Revista Transporte y Territorio*, núm. 16, 167-183.

- Osama, A., y Sayed, T. (2017). Investigating the effect of spatial and mode correlations on active transportation safety modeling. *Analytic Methods in Accident Research*, 60-74. doi:<https://doi.org/10.1016/j.amar.2017.08.003>
- Pazdan, S., Kiec, M., y D'agostino, C. (2021). Impact of environment on bicycle travel demand—Assessment using bikeshare system data. *Sustainable Cities and Society* - 67, 1-8. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102724>
- Polders, E., & Brijs, T. (2018). How to analyse accident causation? A handbook with focus on vulnerable road users. Deliverable 6.3. Horizon 2020 EC Project, InDeV. Hasselt, Belgium: Hasselt University.
- Pritchard, R. (2018). Revealed Preference Methods for Studying Bicycle Route Choice—A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15, 470, 1-30.
- Pritchard, R., Frøyen, Y., y Snizek, B. (2019). Bicycle Level of Service for Route Choice—A GIS Evaluation of Four Existing Indicators with Empirical Data. *International Journal of Geo-Information*, 20.
- Ríos, R., Taddia, P., Pardo, C., y Lleras, N. (2015). *Ciclo-inclusión en América Latina y el Caribe: Guía para impulsar el uso de la bicicleta*. Banco Interamericano de Desarrollo BID.
- Rodriguez-Valencia, A., Rosas-Satizabal, D., Unda, R., y Handy, S. (2021). The decision to start commuting by bicycle in Bogotá, Colombia. *Travel Behaviour and Society*, 57-67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tbs.2021.02.003>
- Rojo, Jairo, (2010). Universidad de Costa Rica. www.stat.rice.edu. Obtenido de http://www.stat.rice.edu/~jrojo/PASI/lectures/Costa%20rica/4_Analisis_Correspondencias_Multiples.pdf
- Romanillos, G., y Gutiérrez, J. (junio de 2020). Cyclists do better. Analyzing urban cycling operating speeds and accessibility. *International Journal of Sustainable Transportation*, 448-464. Obtenido de

<https://www.tandfonline.com/doi/figure/10.1080/15568318.2019.1575493?scroll=top&needAccess=true>

Romanillos, G., Zaltz Austwick, M., Ettema, D., y De Kruijf, J. (2016). Big Data and Cycling. *Transport Reviews* 36:1, 114-133.

Rosas-Satizábal, D., Guzmán, L., y Oviedo, D. (2020). Transportation Research Part D 88 (2020) 102562 Available online 30 September 2020 1361-9209/© 2020 Elsevier Ltd. All rights reserved. Cycling diversity, accessibility, and equality: An analysis of cycling commuting in Bogota. *Transportation Research Part D*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102562>

RStudio. (2006). *Cran R project*. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/biclust/index.html>

RStudio. (2015). *Cran R Project*. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/NbClust/index.html>

RStudio. (2021). *Cran R project*. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/lubridate/index.html>

RStudio. (2021). *Cran R Project*. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/clustertend/index.html>

RStudio. (2021). *Cran R Project*. Obtenido de <https://cran.r-project.org/web/packages/ggplot2/index.html>

Sáenz Galvis, J. (2015). *La influencia del carril de desplazamiento en la severidad de los accidentes con ciclistas en Bogotá*. Bogotá: Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/18601/u722612.pdf?sequence=1>

Sagaró, N. M., y Zamora, L. (2020). Multivariate Statistical techniques for the study of causality in medicine. *Revista de Ciencias Médicas de Pinar del Río*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-31942020000200287

- Sarrica, M., Alecci, E., Passafaro, P., Rimano, A., y Mazzara, B. (2019). The social representations of cycling practices: An analysis of symbolic, emotional, material and bodily components, and their implication for policies. *Transportation Research Part F*, 119-132. doi:<https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.04.019>
- Secretaría Distrital de la Mujer. (2019). *Memorias I Congreso Internacional 50-50 ¡Más Mujeres en Bici!* Obtenido de <http://omeg.sdmujer.gov.co/images/files/congreso/files/memorias.pdf>
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2016). *Plan Bici*. Obtenido de https://www.movilidadbogota.gov.co/web/plan_bici
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2017). *Manual del Buen Ciclista*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2017, 2018 y 2019). *Anuario de siniestralidad*. Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá. Obtenido de <https://www.simur.gov.co/portal-simur/wp-content/uploads/2019/files/datos-abiertos/documentos/anuario>
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2 de julio de 2019). Lineamientos Técnicos en Materia de Seguridad Vial. Tema: Planificación, evaluación y diseño de ciclo-infraestructura. Bogotá, Bogotá D.C.
- Secretaría Distrital de Movilidad. (18 de julio de 2019). *Seleccionadas las propuestas ganadoras para participar en el I Congreso Internacional 50/50 Más mujeres en bici*. Obtenido de https://www.movilidadbogota.gov.co/web/Noticia/seleccionadas_las_propuestas_ganadoras_para_participar_en_el_i_congreso_internacional_5050
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2020). *Manual del buen ciclista*. (A. M. Bogotá, Ed.) Obtenido de La nueva movilidad: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/05-10-2020/manual_del_buen_ciclista.pdf

-
- Secretaría Distrital de Movilidad. (16 de marzo de 2020). *movilidadbogota.gov.co*. Obtenido de https://www.movilidadbogota.gov.co/web/noticia/bogota_dispone_de_117_kilometros_de_ciclovias_temporales_0
- Secretaría Distrital de Movilidad. (22 de abril de 2020). *www.movilidadbogota.gov.co*. Obtenido de Movilidad en datos: encuesta de movilidad 2019: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/22-04-2020/20191216_presentacion_encuesta_v2.pdf
- Secretaría Distrital de Movilidad. (12 de junio de 2021). *movilidadbogota.gov.co*. Obtenido de https://www.movilidadbogota.gov.co/web/noticia/con_21_km_de_ciclovias_de_carrera_7_y_calle_13_que_pasaran_a_ser_permanentes_bogota_alcanzara
- Seguro Bici Argentina. (2018). *Segurobici*. Obtenido de <https://www.segurobici.com.ar/blog/biko-una-app-para-andar-en-bicicleta-por-dinero-2/>
- Spiegelman, C., Sug Park, E., y Rilett, L. (2010). *Transportation Statistics and Microsimulation*. CRC Press.
- Stata. (2021). *Software for Statistics and Data Science*. Obtenido de Stata Multivariate Methods: <https://www.stata.com/manuals/mvmcapostestimationplots.pdf>
- Steer Davies Gleave. (2013). *Formulaciòn y estructuraciòn de un plan estratègico para promover el uso de la bicicleta como medio de transporte cotidiano en grupos poblacionales especìficos*. Bogotá: Secretaría Distrital de Movilidad.
- Strauss, J., Miranda-Moreno, L., y Morency, P. (2015). Mapping cyclist activity and injury risk in a network combining smartphone GPS data and bicycle counts. *Accident Analysis and Prevention*, 83, 132-142. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2015.07.014>

- Ton, D., Duives, D., Oded, C., y Hoogendoorn, S. (2018). Evaluating a data-driven approach for choice set identification using GPS bicycle route choice data from Amsterdam. *Travel Behaviour and Society*, 13, 105-117.
- Trejo Alba, C., y Pérez Llerenas, M. (2016). Ciclismo urbano, análisis de indicadores en el contexto latinoamericano ¿qué se mide? *CAGI - Cuerpos Académicos y Grupos de Investigación en Iberoamerica*, 1-16. Obtenido de <http://www.cagi.org.mx/index.php/CAGI/article/view/102/139>
- Underlien Jensen., S. (2007). Bicycle Tracks and Lanes: a Before-After Study. *Transportation Research Board 87th Annual Meeting*, 1-15. Obtenido de <http://www.vehicularcyclist.com/copenhagen2.pdf>
- Unión Temporal - CNC. (2019). *Diseño de metodología para el trabajo de campo, pruebas piloto y ajustes a la metodología diseñada -EM2019*. Bogotá: Secretaría Distrital de Movilidad.
- Unión Temporal Steer-CNC. (2019). *Informe - Etapa V - Caracterización de la Movilidad de Bogotá*. Bogotá: Secretaría Distrital de Movilidad.
- Unión Temporal Steer-CNC. (2021). *Resultados de la Encuesta de Movilidad de Bogotá y municipios vecinos 2019*. Bogotá: Secretaría Distrital de Movilidad.
- Universidad de los Andes y Hill Consulting. (2017). *Cómo promover el buen uso de la bicicleta. Exposición del ciclista en el ámbito urbano. Diagnóstico y Recomendaciones*. Banco Interamericano de Desarrollo BID.
- Vanparijs, J., Int Panis, L., Meeusen, R., y de Geus, B. (2015). Exposure measurement in bicycle safety analysis: A review of the literature. *Accident Analysis and Prevention*, 84, 9-19. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2015.08.007>
- World Health Organization. (2020). *Cyclist safety: an information resource for decision-makers and practitioners*. Geneva: Global Road Safety Partnership. Obtenido de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/336393/9789240013698-eng.pdf>

-
- Xie, K., Ozbay, K., Yang, D., Xu, C., y Yang, H. (2021). Journal of Transport Geography 91 (2021) 102953 Available online 20 January 2021 0966-6923/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved. Modeling bicycle crash costs using big data: A grid-cell-based Tobit model with random parameters. *Journal of Transport Geography*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2021.102953>
- Xu, R., y Wunsch, D. (2009). *Clustering*. (D. B. Fogel, Ed.) New Jersey, United States: IEEE Press Series on Computational Intelligence. Recuperado el 2020
- Yang, Q., Cai, J., Feng, T., Zhengying, L., y Timmermans, H. (2021). Bikeway Provision and Bicycle Commuting: City-Level Empirical Findings from the US. *Sustainability*. doi:<https://doi.org/10.3390/su13063113>
- Yiannakoulias, N., Bennet, S., y Scott, D. (2012). Mapping commuter cycling risk in urban areas. *Accident Analysis and Prevention* 45, 164-172. doi:10.1016/j.aap.2011.12.002
- Zamora Rojas, J., y Pujol Mesalles, R. (2009). *Análisis de ocurrencias de diferentes tipo de accidentes de tránsito en el cantón de Pérez Zeledón, Costa Rica*. Universidad de Costa Rica. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/67716599.pdf>
- Zhang, Y., Lin, D., y Xiaoyue Cathy, L. (2019). Biking islands in cities: An analysis combining bike trajectory and percolation theory. *Journal of Transport Geography*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2019.102497>
- Zhu, S. (2021). Analysis of the severity of vehicle-bicycle crashes with data mining techniques. *Journal of Safety Research*, 218-227. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.11.011>
- Zijing, L., y Wei, F. (2020). Modeling bicycle volume using crowdsourced data from Strava smartphone application. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 334-343. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2020.03.003>