PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIEROS INDUSTRIALES

TITULO:
Aproximación al comportamiento vehicular en la intersección Av. NQS con calle 8 sur en la ciudad de Bogotá

AUTORES:

Carol Johanna Pérez Mera **Héctor Javier Ramos Beltrán**

DIRECTORA:
Lindsay Álvarez Pomar PhD



UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
Bogotá D.C. – Colombia

2017

Dedicamos este proyecto a nuestras familias quienes con su apoyo incondicional y amor hicieron esto posible…
Gracias.

Agradecimientos

A nuestra familia por estar siempre presentes
A Lindsay por la confianza y el apoyo
A David por el esfuerzo
A Ginna por la amistad

Aproximación al comportamiento vehicular en la intersección Av. NQS con calle 8 sur en la ciudad de Bogotá

TABLA DE CONTENIDO

Introducción 8
1. Generalidades del estudio 9
1.1. Descripción del problema 9
1.2. Justificación 14
1.3. Objetivos 15
1.4. Alcance del estudio 15
1.5. Área de estudio 15
1.6. Hipótesis 18
2. Marco teórico 19
2.1. Conceptos generales 19
2.2. Análisis de carga vial 25
2.3. Modelos comportamiento vehicular 26
2.4. Simulación basada en agentes 28
2.4.2. Validación modelos de simulación 29
3. estado del arte 30
3.1. Propiedades sociales en las redes vehiculares 33
4. Metodología 35
3.1. Identificación y relación de variables 36
3.2. Análisis del comportamiento vehicular 39
4. Análisis de entrada 48
4.1. Cálculo de la muestra 48
4.2. Variables 49
4.3. Tratamiento y análisis de datos 49
4.3.1. Pruebas de independencia 50
4.3.2. Pruebas de homogeneidad 59
4.3.3. Pruebas de bondad y ajuste 69
5. Construcción modelo de simulación 72
5.1. Modelo computacional 72
5.2. Planteamiento de escenarios 75
5.3. Análisis de escenarios 80

5.4. Validación del modelo 81
5.4.1. Análisis de datos de salida 81
5.4.2. Medidas de desempeño 82
5.4.3. Longitud de la corrida. 83
5.4.4. Numero de replicas 83
5.4.5. Validación 85
5.5. Implicaciones y recomendaciones 89
6. Conclusiones 91
6.1. Trabajos futuros 93
Referencias 94

LISTA DE ILUSTRACIONES

Grafica No 1 Parque automotor Bogotá 2015.Fuente: Registro Distrital Automotor _____ *10*
Grafica No 2 Inventario y diagnóstico de la malla vial 2015.Fuente: Registro Distrital Automotor _____ *11*
Grafica No 3 Índice de movilidad Fuente: boletín Nº 55 Índice de movilidad en Bogotá D.C. _____ *12*
Grafica No 4 intersección Av. NQS con calle 8 sur _____ *17*
Grafica No 5 intersección Av. NQS con calle 8 sur _____ *18*
Gráfica No 6 Metodología de investigación _____ *35*
Grafica No 7 Variables que influyen en el comportamiento vehicular. Fuente: Propia _____ *36*
Grafica No 8 Relación de variables que influyen en el comportamiento vehicular. Fuente: Propia _____ *38*
Grafica No 9 medición distancia tramo analizado. Fuente. Google Maps _____ *40*
Gráfica No 10 Espaciamiento entre vehículos. Fuente. Propia _____ *41*
Gráfica No 11 cruce vehículos diferentes accesos Fuente. Propia _____ *42*
Gráfica No 12 sobrepaso de vehículos en semáforo en rojo _____ *43*
Gráfica No 13 sobrepaso de vehículos. Fuente. Propia _____ *44*
Gráfica No 14 cambios de carril. Fuente. Propia _____ *45*
Gráfica No 15 infracciones motocicletas. _____ *46*
Gráfica No 16 infracciones ciclistas _____ *47*
Grafica No 17 tratamiento estadístico. Fuente propia _____ *49*
Grafica No 18 prueba de independencia tiempo entre arribos _____ *51*
Gráfica No 19 prueba de independencia datos de velocidad acceso norte _____ *52*
Grafica No 20 prueba de independencia datos de espaciamiento acceso norte _____ *52*
Grafica No 21 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso norte _____ *53*
Grafica No 22 prueba de independencia datos de velocidad acceso occidente _____ *54*
Grafica No 23 prueba de independencia datos de espaciamiento acceso occidente _____ *54*
Grafica No 24 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso occidente _____ *54*
Grafica No 25 prueba de independencia datos de velocidad acceso sur _____ *55*
Grafica No 26 prueba de independencia datos de espaciamiento entre vehículos acceso sur _____ *56*
Grafica No 27 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso sur _____ *56*
Grafica No 28 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso oriente _____ *57*
Grafica No 29 prueba de independencia datos de espaciamiento entre vehículos acceso oriente _____ *58*
Grafica No 30 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso oriente _____ *58*
Grafica No 31 componentes NetLogo. Fuente. Propia. _____ *72*
Grafica No 32 tortugas modelo computacional _____ *74*
Grafica No 33 Interfaz simulación NetLogo. Fuente. Propia. _____ *75*
Grafica No 34 Escenarios planteados _____ ***¡Error! Marcador no definido.***
Grafica No 35 variación velocidad según escenario _____ *78*
Grafica No 36 variación longitud de cola según escenario _____ *78*
Grafica No 37 implicaciones de orden social _____ *89*

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Intersecciones vehiculares priorizadas *16*
Tabla 2 Ciclos de semáforo por acceso *17*
Tabla 3 Medidas de eficiencia (HCM,2000) *23*
Tabla 4 Nivel de servicio *23*
Tabla 5 tamaño promedio de pelotón acceso norte-sur *42*
Tabla 6 Variables del comportamiento vehicular *46*
Tabla 7 variables del comportamiento vehicular: análisis de entrada *49*
Tabla 8 abreviaciones variables de entrada *50*

Tabla 9 prueba de rachas conjunto de datos tiempo entre arribos *50*
Tabla 10 prueba de rachas conjunto de datos acceso norte *51*
Tabla 11 prueba de rachas conjunto de datos acceso occidente *53*
Tabla 12 prueba de rachas conjunto de datos acceso sur *55*
Tabla 13 prueba de rachas conjunto de datos acceso Oriente *57*
Tabla 14 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo entre arribos *59*
Tabla 15 Resultados prueba de medianas: datos tiempo entre arribos *59*
Tabla 16 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos velocidad acceso norte *60*
Tabla 17 Resultados prueba de medianas: datos velocidad acceso norte *60*
Tabla 18 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos espaciamiento entre vehículos acceso norte *61*
Tabla 19 Resultados prueba mediana: datos espaciamiento de vehículos acceso norte *61*
Tabla 20 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo de reacción acceso norte *62*
Tabla 21 Resultados prueba medianas: datos tiempo de reacción acceso norte *62*
Tabla 22 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos velocidad acceso occidente *62*
Tabla 23 Resultados prueba medianas: datos velocidad acceso occidente *63*
Tabla 24 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos espaciamiento entre vehículos acceso occidente *63*
Tabla 25 Resultados prueba medianas: datos espaciamiento entre vehículos acceso occidente *63*
Tabla 26 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo de reacción entre vehículos acceso occidente *64*
Tabla 27 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos velocidad acceso sur *64*
Tabla 28 Resultados prueba medianas: datos velocidad acceso sur *65*
Tabla 29 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos espaciamiento entre vehículos acceso sur *65*
Tabla 30 Resultados prueba medianas: datos espaciamiento entre vehículos acceso sur *65*
Tabla 31 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo de reacción acceso sur *66*
Tabla 32 Resultados prueba medianas: datos tiempo de reacción entre vehículos acceso sur *66*
Tabla 33 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos velocidad acceso oriente *67*
Tabla 34 Resultados prueba medianas: datos velocidad acceso oriente *67*
Tabla 35 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos espaciamiento entre vehículos acceso oriente *67*
Tabla 36 Resultados prueba medianas: datos espaciamiento entre vehículos acceso oriente *68*
Tabla 37 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo de reacción acceso oriente *68*
Tabla 38 Resultados prueba medianas: datos tiempo de reacción acceso oriente *68*
Tabla 39 Definición de poblaciones *69*
Tabla 40 Distribución tiempo entre arribos *71*
Tabla 41 Tamaño entorno de simulación *72*
Tabla 42 Tiempos semáforos *75*
Tabla 43 Probabilidad ruta *76*
Tabla 44 Proporción razas *76*
Tabla 45 promedio espaciamiento por acceso y tipo de raza *79*
Tabla 46 Resultados medidas de desempeño por escenario *81*
Tabla 47 medidas de desempeño en la premuestra *84*
Tabla 48 Numero de replicas *84*
Tabla 49 Intervalo de confianza longitud de cola *86*
Tabla 50 Prueba t de datos pareados escenario real Vs escenario 2 ..... *87*
Tabla 51 Prueba t de datos pareados escenario real Vs escenario 3 ..... *88*
Tabla 52 Prueba t de datos pareados escenario real Vs escenario 4 ..... *88*

INTRODUCCIÓN

El alto grado de saturación de las vías en la capital a pesar de la alta inversión por parte del distrito y los diferentes proyectos presentados genera el interrogante de que tan apropiados son estos esfuerzos, actualmente las investigaciones en movilidad abarcan enfoques tales como modelos de optimización (Peng, G., Lu, W., & He, H. 2016) autómatas celulares (Rodríguez.2002) entre otros, en la recopilación de estos modelos y métodos, la simulación basada en agentes se presenta como una herramienta para el estudio del fenómeno de la congestión.

El presente proyecto pretende la identificación de las variables del comportamiento vehicular y su relación con la ocupación de vías, con el fin de enriquecer el cálculo de carga vial y permitir el planteamiento de estrategias dirigidas a una movilidad racional y sostenible en el distrito. A partir del problema planteado se propone una metodología la cual se compone de, en primera instancia, la revisión de literatura y consulta de expertos sobre el comportamiento vehicular, seguido de esto, la identificación de los principales métodos utilizados para el cálculo de cargas en vías a fin de exponer las variables que lo componen y que a su vez se relacionan con el comportamiento vehicular, considerando lo resumido en la revisión de literatura y de expertos.

Como tercera fase, el modelamiento, aplicando modelos multiagentes, del comportamiento de los vehículos. Por último, se concluye con la comparación de los efectos de considerar el comportamiento vehicular en un análisis de cargas a través del análisis de escenarios del modelo anteriormente utilizado.

1. GENERALIDADES DEL ESTUDIO

1.1. Descripción del problema

La planeación del transporte tiene como objetivo básico la utilización óptima de la infraestructura vial y de los medios de transporte disponibles para hacer frente de manera eficaz a la demanda de transporte de una región (Secretaría de Tránsito Transporte, 2005). Sin embargo, los métodos cuantitativos no han sido precisamente el enfoque más utilizado para su análisis, a pesar de tener como objetivo la optimización.

Diversas son las estrategias que diferentes actores han propuesto para dar solución a los problemas de movilidad como la congestión, normalmente considerada como la principal causa derivada del incremento del tráfico, a lo largo de la historia bogotana, sin embargo, a la larga la ejecución de estas, en el caso de haber sido implementadas, no han representado mejoras significativas.

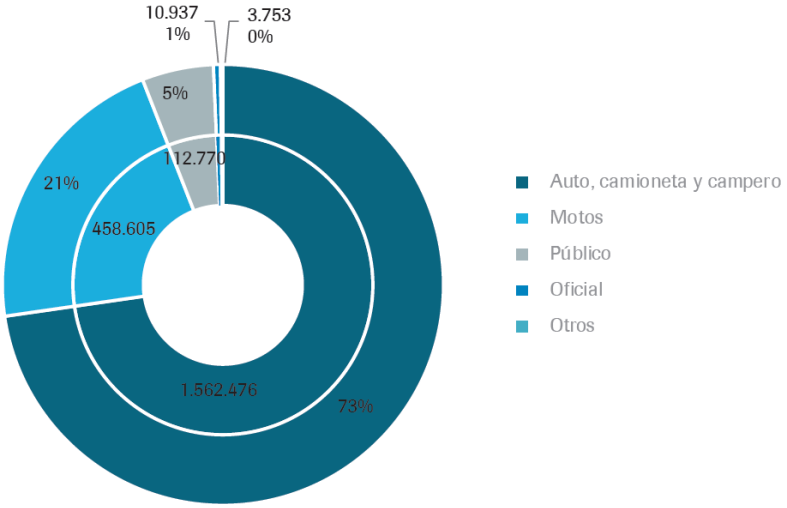
En el ámbito nacional se han adoptado una serie de normas para permitir los cobros por congestión que desestimularían el uso de vehículos particulares. Primero, la Ley 105 de 1993, artículo 28, por la cual se permite a los municipios y a los distritos establecer "impuestos que desestimulen el acceso de los vehículos particulares a los centros de las ciudades". Luego, el Plan Nacional de Desarrollo de 2011 (art. 90 de la Ley 1450 de 2011, reglamentado por el Decreto 2883 de 2013) "habilita a municipios y distritos para establecer tasas por uso de áreas de alta congestión". Finalmente, el Plan Nacional de Desarrollo de 2014-2018, "Todos por un mismo país", en el artículo 32 habilita los cobros por congestión como una fuente de financiación que permitan una sostenibilidad económica, ambiental, social e institucional de los sistemas de transporte.

Para el caso de Bogotá, en cada plan de desarrollo distrital se esboza una serie de ejes transversales partiendo de un estudio previo que compila datos tales como el tiempo y total de viajes realizados, condición de la malla vial, velocidad promedio, accidentes de tránsito y resultados obtenidos en encuestas sobre percepción ciudadana.

Otra perspectiva de las medidas por ejecutar o ya llevadas a cabo, es la toma de políticas extranjeras que al ser adecuadas en la ciudad no consideran variables como la cultura, la

educación tanto del peatón como del conductor, la penalización que se imponga por el no cumplimiento, la diferencia en la infraestructura o un factor acumulativo de insatisfacción.

Bogotá, en cifras del año 2015, contaba con un parque automotor de 2.148.541 vehículos, como se presenta en la Grafica No.1, de los cuales el 94% corresponde a transporte particular y cuya cantidad va en aumento (Registro Distrital Automotor, 2015).



Grafica No 1 Parque automotor Bogotá 2015.Fuente: Registro Distrital Automotor

Los retos asociados a estas estadísticas abarcan necesidades desde construcción de infraestructura y estrategias adecuadas para la prevención de accidentes. Estos últimos ascienden a un total de 31.333 por causas como choques con otro vehículo, atropello, caída de ocupantes entre otros. (Secretaría Distrital de Movilidad (SDM). Bogotá, 2015); Otro reto importante de la ciudad es la reducción de los tiempos de viaje.

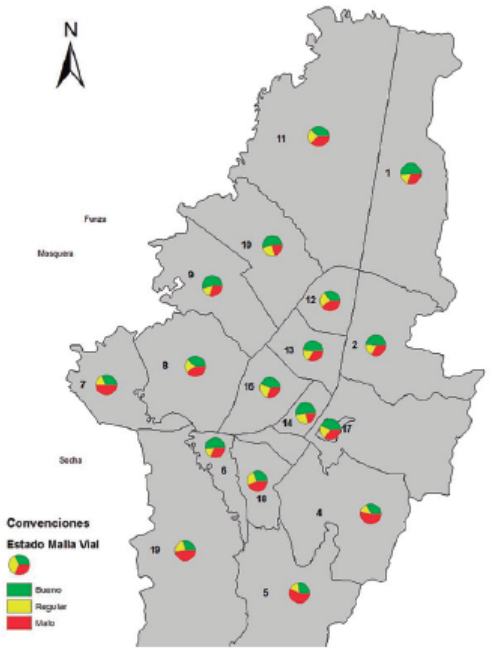
Los tiempos promedio de desplazamiento en las ciudades se han convertido en un indicador clave, ya que influencian la productividad de las mismas. Según el observatorio de movilidad de Bogotá, los tiempos promedio de viaje en la ciudad haciendo uso de Transmilenio están en 76 minutos, que representa un aumento considerable con respecto a 2013 y 2014, cuando se registraron 52 minutos (Andes, 2016). En contraste, por ejemplo, la media nacional en Estados Unidos es de 26 minutos y en Nueva York, donde tienen el tiempo promedio de viaje más altos del país, tienen 40 minutos.

El agravante de la situación, es que la inversión que realiza el Distrito se enfoca a soluciones parciales y reflejan desconocimiento sobre la situación actual de la movilidad,

como el atraso en infraestructura y la capacidad real de las vías. El presupuesto aprobado para el plan de desarrollo distrital de la alcaldía actual destina para movilidad 43,6 billones de pesos, aproximadamente 46% del presupuesto general, para reparación y construcción de malla vial, ampliación de la red troncal de Transmilenio, ejecución del 30 por ciento de la primera línea del Metro y optimización del Sistema Integrado de Transporte Público.

En el caso de la infraestructura vial, fue aprobado para el distrito el presupuesto de 10.4 billones de pesos para reparación y mantenimiento de esta, en las diferentes localidades, sin considerar la construcción y ampliación de la misma. Siendo Suba, Bosa y Barrios unidos las localidades con mayor afectación en el estado de la malla vial 42%, 39% y 37%, de la infraestructura vial se encuentra en mal estado, respectivamente, (observatorio de movilidad,2016).

En la gráfica No.2 se presenta el inventario y diagnóstico de la malla vial para el año 2015.



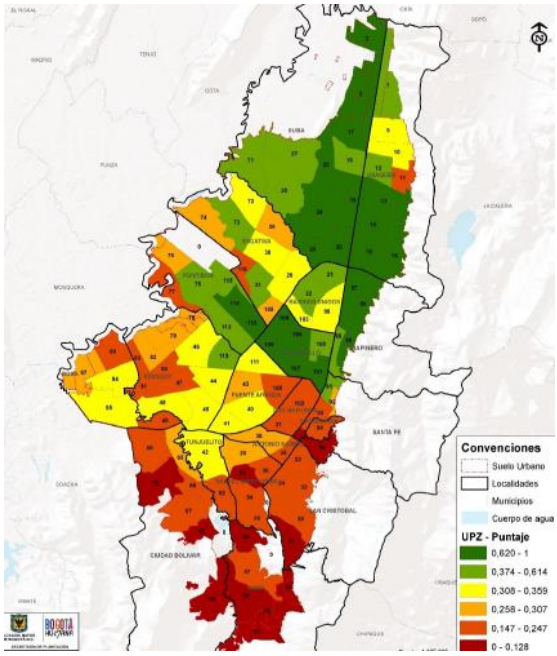
Localidad	Arterial Km-Carril	Intermedia Km-Carril	Local Km-Carril	Total Km-Carril
1. Usaquén	888	251	585	1.119
2. Chapinero	189	177	220	586
3. Santa Fe	87	97	146	279
4. San Cristóbal	64	181	476	722
5. Usme	119	144	461	724
6. Tunjuelito	62	87	184	333
7. Bosa	78	149	578	806
8. Kennedy	258	665	966	1.558
9. Fontibón	281	266	625	869
10. Engativá	219	860	787	1.615
11. Suba	846	279	1.069	1.695
12. Barrios Unidos	117	200	265	582
13. Teusaquillo	150	212	244	607
14. Los Mártires	60	186	174	369
15. Antonio Nariño	60	87	129	277
16. Puente Aranda	199	216	479	894
17. La Candelaria	12	35	29	76
18. Rafel Uribe Uribe	54	177	459	690
19. Ciudad Bolívar	97	162	809	1.068
TOTALES	2.884	6.548	8.286	14.518

Grafica No 2 Inventario y diagnóstico de la malla vial 2015.Fuente: Registro Distrital Automotor

Otro factor clave que afecta la movilidad se origina en la forma como los ciudadanos se relacionan entre sí y con la infraestructura urbana. Los comportamientos de los ciudadanos en muchas circunstancias son indeseables. Según la encuesta de percepción sobre las condiciones de calidad del transporte publico 2014, el 69% de los encuestados consideran

que la cultura ciudadana es uno de los aspectos que contribuyen en mayor medida a mejorar la movilidad.

Actualmente la movilidad en Bogotá se puede representar con la gráfica No.3 en la que se observa el índice de movilidad para cada unidad de planeación zonal-UPZ. Se estipula que tienen mejor movilidad las UPZ con valores más cercanos a 1 (color verde) y los peores cuando el valor es cercano 0.0128 (color rojo).



Grafica No 3 Índice de movilidad Fuente: boletín Nº 55 Índice de movilidad en Bogotá D.C.

Este índice muestra que el nivel de motorización y de ingresos influye en las posibilidades de trasladarse en la ciudad; lo que implica que a pesar de las altas inversiones a corto plazo la adquisición de autos se convierte en una solución debido a que esto es lo que permite una mayor movilidad., incidiendo en la tendencia de compra masiva de vehículos y motocicletas (con un porcentaje de aumento del 1% y 104% respectivamente) (Registro Distrital Automotor, 2015) generando cada vez una mayor congestión vehicular.

Los esfuerzos académicos frente al tema de movilidad son de enfoques variados, algunos de los cuales reconocen la conducción como un proceso de toma de decisiones y con un análisis de nivel microscópico, se enfocan en el comportamiento individual del conductor ante diferentes situaciones.

La evaluación de estos modelos se soporta en la identificación de dos (2) tareas básicas por parte del individuo: control de la posición a lo largo y ancho de la carretera, donde el control longitudinal se prioriza en la realización de modelos tales como, *free-flow behaviour* donde no hay interacción entre vehículos, por lo que el conductor puede decidir y mantener una velocidad (Chakroborty Partha ,2006), el siguiente modelo y cuya representación ha sido relevante en los estudios de los últimos dos siglos (Pipes, 1953), es el modelo *car-following* el cual relaciona dos sensaciones que dominan al conductor, urgencia y velocidad, partiendo de una visión más microscópica del comportamiento (McDonald,2000).

En modelos representativos del nivel macroscópico, como los anteriormente mencionados, es visible la simplificación del comportamiento y el establecimiento de condiciones alejadas de las reales, evidenciando que la variabilidad que implica la conducción, no es reconocida como un factor clave en la congestión.

Por lo tanto, se puede interpretar que hay que superar el desconocimiento y empezar a realizar estudios tendientes a la solución de dicha problemática que es lo que la presente investigación pretende: la identificación de las variables del comportamiento vehicular y su relación con la ocupación de vías, con el fin de enriquecer el cálculo de carga vial y permitir el planteamiento de estrategias dirigidas a una movilidad racional y sostenible en el distrito.

1.2. Justificación

El problema de la congestión vehicular es un factor común en las grandes ciudades del mundo (Milad,2016), más la razón por la que se produce depende tanto de las características geográficas, la infraestructura vial y la cultura ciudadana tanto de conductores como de peatones, propias de la localización de estudio.

En el marco del actual plan de desarrollo distrital, el tema de movilidad se integra en los pilares de democracia urbana y construcción de comunidad, asegurando una relación directa de la calidad de vida con la facilidad de desplazamiento en la ciudad (Alcadia mayor de Bogotá,2015).

En Bogotá, las horas perdidas en la congestión vehicular ascienden a un total de 500 anualmente, lo que en términos económicos se traduce en una pérdida aproximada de un mes de salario mínimo para 967 personas y un total de 2 puntos porcentuales del PIB nacional (El tiempo,2016), considerando a su vez, que el tiempo promedio de viaje en Bogotá es de 70 minutos (UniAndes,2016).

De igual manera, la calidad del aire de la ciudad ha presentado un deterioro debido a las emisiones fijas y móviles en las distintas localidades (Secretaría de Medio Ambiente y la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, 2016) con implicaciones directas en la salud de los ciudadanos.

A pesar de identificar los impactos de la congestion vehicular, para las disposiciones sobre movilidad, especialmente sobre planeación y construcción de vías, las principales medidas de desempeño para la toma de decisiones son la cantidad de kilómetros de vía y las conexiones que se logran (Conpes,2013).Sin embargo, el comportamiento y los hábitos en la vía pueden ser determinantes en cuanto a que pueden hacer disminuir la movilidad y con ello la capacidad real de la vía con respecto a la teórica *(*Jakovcevic,2015).

La planeación sin tener en cuenta los comportamientos, implícitamente permite la formación de un desfase en infraestructura y el desconocimiento de la capacidad real de las vías con que cuenta la ciudad, por lo que, el presente proyecto se soporta en identificar la influencia del comportamiento vehicular en la ocupación de las vías, a fin de facilitar el planteamiento de estrategias eficientes que contrarresten las consecuencias de la congestión vehicular en la ciudad.

1.3. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Identificar las relaciones entre comportamiento vehicular y la ocupación de vías

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar las variables que influyen sobre el comportamiento vehicular
- Reconocer los métodos principales para el cálculo de la ocupación de las vías y como se considera el comportamiento en estos
- Relacionar las variables que influyen en el comportamiento vehicular con los métodos para el cálculo de cargas en vías
- Verificar mediante un modelo de simulación, la relación entre comportamiento vehicular y ocupación de vías

1.4. Alcance del estudio

Para la presente investigación, se delimita la evaluación de la hipótesis planteada en la intersección Av.NQS con calle 8 sur de la ciudad de Bogotá, contemplando inicialmente la revisión de literatura disponible acerca de modelos de comportamiento vehicular y modelos de análisis de carga vial y la obtención de información en campo, para luego establecer, mediante análisis de causalidad las variables del comportamiento vehicular a considerar y proceder a verificar mediante un modelo de simulación, la relación entre comportamiento vehicular y ocupación de vías a fin de facilitar el planteamiento de estrategias eficientes que contrarresten las consecuencias de la congestión vehicular en la ciudad.

1.5. Área de estudio

Debido a las condiciones de su malla vial, el alto flujo vehicular en horas pico del día y fallos habituales en la semaforización, entre otros factores, el distrito ha priorizado la intervención de diez intersecciones vehiculares priorizadas por el Distrito (El espectador,2016), específicamente aquellas en las que la demanda sobrepasa la capacidad del tramo.

En general, los giros a la izquierda y el flujo de operación superior a la capacidad de las vías en las intersecciones presentadas a continuación en la tabla No.1, suponen las principales causas de intervención y priorización por parte de secretaria de movilidad, siendo las Intersecciones Av. Ciudad de Cali con Av. Villavicencio y Av. Ciudad de Cali con calle 42A sur las primeras a ser intervenidas (El tiempo,2016).

Tabla 1 Intersecciones vehiculares priorizadas

Intersecciones vehiculares priorizadas (El espectador,2016)				
Intersección	Localidad	Capacidad vehículos por hora	Demanda vehículos por hora	Longitud cola de vehículos (m)
Av. NQS con calle 8 sur	Puente Aranda	15.712	16.676	2259
Av. Gaitán Cortes con calle 44 sur	Kennedy	3.838	5.394	2.386
Av. Ciudad de Cali con Av. Villavicencio	Kennedy	4.420	5.425	1.296
Av. Ciudad de Cali con calle 42A sur	Kennedy	4.415	5.431	696
Av. Centenario con carrera 123	Fontibón	6.282	8.329	1.248
Av. La Esperanza con carrera 103	Fontibón	1.857	2.676	1.296
Calle 80 con carrera 94	Engativá	8.008	8.613	10.381
Av. Ciudad de Cali con calle 72	Engativá	4.988	5.996	2.700

Para la evaluación de la hipótesis planteada en la presente investigación, la intersección a evaluar es la intersección Av. NQS con calle 8 sur en la localidad de Puente Aranda, partiendo de criterios el volumen de circulación de vehículos pesados y transporte público, carriles auxiliares en la vía o en tramos de esta y la demanda vehicular próxima o mayor a la capacidad.

Como corredor principal, la Carrera 30, atiende los viajes con destino al centro de Bogotá extendiéndose desde las áreas más periféricas del área urbana, por lo que los niveles de saturación alcanzados en las horas pico de la ciudad, tanto en horas de la mañana como de la tarde, ponen en riesgo el funcionamiento de este eje vial. (Alcaldía mayor de Bogota,2014)

La intersección cuenta con doce carriles, como se muestra en la gráfica No.4, de los cuales cuatro son carriles preferenciales para Transmilenio, el ancho de carril es de 3,2 metros frente a un estándar ideal de 3,65 (HCM,2000).



Grafica No 4 intersección Av. NQS con calle 8 sur

Se cuenta a su vez con cuatro accesos cada uno de estos semaforizado con tiempos de ciclos determinados, como se procede a presentar en la tabla No.2 y cuyos valores corresponden a la toma de datos en campo realizada . Para el acceso de norte a sur se observa la división de cuatro a seis carriles, correspondientes a las salidas hacia la carrera 30 y a la autopista sur, contrario al acceso de sur a norte, donde se reduce de seis carriles, respectivos a la carrera 30 y la transversal 31 a cuatro carriles para un tramo de la autopista sur.

Respecto a los accesos de occidente y oriente, los carriles se mantienen en un total de tres. Cada acceso deriva en una salida semaforizada con tiempos de ciclo de 1:26,02 segundos para la luz roja y 31,45 segundos para el paso vehicular.

Tabla 2 Ciclos de semáforo por acceso

Ciclos de semáforo por acceso		
Acceso	Tiempo [seg]	
	Rojo	Verde
Norte-Sur	56,49	1:02,94
Occidente-Oriente	1:35,94	24,51
Sur-Norte	56,49	1:02,94
Oriente-Occidente	1:35,94	24,51

El pavimento se encuentra en condiciones adecuadas y existe solo una zona de paraderos del sistema integrado de transporte público en el sentido norte-sur de la vía, como se muestra en la gráfica No.5



Grafica No 5 intersección Av. NQS con calle 8 sur

1.6. Hipótesis

La inclusión de variables del comportamiento vehicular a modelos de ocupación de vías, específicamente a los métodos utilizados en Bogotá, representa una posible mejora para establecer condiciones más cercanas al contexto real, para el presente proyecto, las intersecciones vehiculares con intervención priorizada en el distrito capital.

2. MARCO TEÓRICO

En el presente trabajo de investigación se proyecta la identificación de las relaciones entre comportamiento vehicular y la ocupación de las vías en la ciudad de Bogotá. En ese orden, se hace necesario establecer ejes conceptuales que delimiten el problema de investigación.

En primer término, se procede a abordar conceptos generales del tema propuesto.

2.1. Conceptos generales

Desde la construcción del Highway Research Board (HRB) en 1920, actualmente Transportation Research Board (TRB), los Estados Unidos han sido precursores en la investigación del tema de movilidad, publicando los resultados a través el manual de capacidad de carreteras (Highway Capacity Manual, HCM) y sus correspondientes ediciones iniciando con la desarrollada en el año de 1950.

Es de este manual (HCM,2000) que se procede a identificar los conceptos generales necesarios para abordar de forma completa el problema aquí propuesto.

Capacidad, existen varias definiciones de capacidad en cuanto a ingeniaría de tránsito y movilidad se refiere, por ejemplo, el código Nacional de Tránsito y Transporte (Ley 769 de 2002) en el artículo 2 hace distinción entre dos tipos de capacidades: la capacidad de pasajeros y la capacidad de carga de los vehículos, sin embargo, en su trabajo "Capacidad y niveles de servicio" Cerquera Escobar (2007) define la capacidad como

> El flujo máximo horario al que se puede razonablemente esperar que las personas o vehículos atraviesen un punto o sección uniforme de un carril o calzada durante un periodo de tiempo dado, bajo condiciones prevalecientes de la vía, del control y del tránsito.

Esta definición envuelve de una forma global y breve el concepto de capacidad.

Según el manual de capacidad de carreteras (HCM,2000), la capacidad se entiende como la cantidad máxima de vehículos y/o peatones que pueden desplazarse o circular en determinado espacio físico y periodo de tiempo, se definen, de igual manera, tres niveles, como lo son:

Capacidad básica, número máximo de automóviles que podían pasar por un punto dado en una trocha o calzada durante una hora, bajo las condiciones de calzada y tránsito más próximas a las ideales que sea posible obtener.

Capacidad posible, número máximo de vehículos que podían pasar por un punto dado en una trocha o calzada durante una hora, bajo las condiciones prevalecientes de calzada y tránsito.

Capacidad práctica, número máximo de vehículos que podían pasar por un punto dado de una calzada o una trocha determinada durante una hora, sin que la densidad de tránsito sea tan grande como para que cause demora poco razonable, peligro o restricción de la libertad del conductor para maniobrar bajo las condiciones prevalecientes de calzada y tránsito. Anónimo (Capacidad vial,2010, p.1)

La capacidad se expresa en vehículos por hora y se definen los siguientes conceptos:

- V: Duración de la fase verde [seg]
- R: Duración de la fase roja [seg]
- T: Ciclo del semáforo [seg]

Mientras el semáforo esté en su fase de verde podrá pasar un número máximo de vehículos hora, que constituye lo que se denomina intensidad de saturación. Multiplicando esta intensidad de saturación por la relación entre la duración de la fase de verde y la del ciclo se obtiene el máximo número de vehículos que pueden pasar en una hora, es decir:

$$C = S * \frac{V}{T}$$

Donde:

- C: Capacidad (vehículos/hora)
- S: Intensidad de saturación (vehículos/hora)
- V: Duración de la fase de verde (segundos)
- T: Duración del ciclo (segundos)

Si en un tramo existen carriles reservados para determinados movimientos, como giros a la izquierda o a la derecha, se estudian separadamente de los demás carriles del acceso. Se forman así dentro de un mismo tramo varios grupos de carriles que se analizan

separadamente. El procedimiento para el cálculo de la intensidad de saturación para cada grupo es el siguiente:

$$Si = So\ N\ Fw\ FHV\ Fg\ Fp\ Fbb\ Fa\ FLU\ FLT\ FRT\ FLpb\ FRpb$$

Siendo,

- Si = Intensidad o flujo de saturación para el grupo de carriles, expresado como el total para todos los carriles del grupo de carriles en las condiciones prevalecientes [veh/hora de verde]
- So = Intensidad o flujo de saturación ideal por carril [veh/hora de verde/carril]
- N = número de carriles en el grupo de carriles
- FW = Factor de ajuste por ancho de carril
- FHV = Factor de ajuste por vehículos pesados
- Fg = Factor de ajuste por pendiente
- Fp = Factor de ajuste por estacionamiento en el carril
- Fbb = Factor de ajuste por efecto de bloqueo local de buses por paradas
- Fa = Factor de ajuste por tipo de área
- FLU = Factor de ajuste por utilización del carril
- FLT = Factor de ajuste por giros izquierdo en el grupo de carril
- FRT = Factor de ajuste por giros a la derecha en el grupo de carril
- FLpb = Factor de ajuste por conflicto con peatones/ciclistas en el giro izquierdo
- FRpb = Factor de ajuste por conflicto con peatones/ciclistas en el giro a la derecha

Demanda, corresponde a la cantidad de vehículos y/o peatones que requieren desplazarse o circular un tramo especifico de vía.

Densidad, es el número de vehículos que ocupa un tramo de carretera o carril , se expresa en términos de vehículos por kilómetro $\left[\frac{veh}{Km}\right]$. El cálculo de esta corresponde a un parámetro directamente relacionada con la demanda,

$$D = \frac{v}{s}$$

Donde:

- v: razón de flujo [veh/hr]
- s: velocidad promedio de viaje [km/hr]

Cuando todos los vehículos están parados en fila, sin huecos entre ellos, se obtiene el máximo de densidad, que será igual al producto de la inversa de la longitud media de los vehículos por el número de carriles. En estas condiciones, a los vehículos les resultaría imposible moverse incluso a pequeña velocidad sin chocar unos con otros.

La calidad de la circulación depende de la densidad del tráfico, ya que, al aumentar, resulta más difícil mantener la velocidad que el conductor desea, y este se ve obligado a realizar un mayor número de maniobras (cambios de carril, aceleraciones, frenados, etc.), originando una conducción incómoda. Por lo tanto, con densidades muy bajas, la circulación puede considerarse fluida, pero a medida que va aumentando y acercándose a su valor máximo, se circula a velocidades muy bajas con constante paradas y arranques (Belda,2010).

Intensidad, representa el número de vehículos que pasan por una sección durante un intervalo de tiempo inferior a una hora, expresado como una tasa horaria equivalente.

Nivel de servicio, medida cualitativa que describe las condiciones operacionales dentro de un flujo vehicular, partiendo de medidas de servicio como velocidad y tiempo de viaje. Al establecer condiciones de operación, se plantean seis niveles de servicio (HCM, 2000)

El **nivel A** equivale a un alto grado de continuidad en el flujo vehicular. Para los **niveles B** y **C** es notable un incremento en el flujo, aumentado la formación de pelotones de vehículos, para el **nivel de servicio D**, el sobrepaso se dificulta por el alto volumen y se aproxima a cero en el **nivel E** y **F**, para el caso del **nivel F** el tramo de vía se encuentra congestionado ya que la demanda excede la capacidad.

Para la identificación del nivel de servicio en diferentes tipos de infraestructura vial se establecen las siguientes medidas de eficiencia presentadas en la tabla No.3,

Tabla 3 Medidas de eficiencia (HCM,2000)

Medidas de eficiencia (HCM,2000)	
Tipo de infraestructura vial	**Medidas de eficiencia**
Autopistas • Segmentos básicos • Tramos de entrecruzamiento • Rampas de enlaces	Densidad, velocidad, relación volumen a capacidad Densidad, velocidad Densidad
Carreteras • Múltiples trochas • Dos trochas	Densidad, velocidad, relación volumen a capacidad Velocidad, % de tiempo de seguimiento
Intersecciones • Con semáforos • De prioridad	Demora por controles
Arterias urbanas	Velocidad de recorrido
Transporte colectivo	Frecuencia, horas de servicio, carga de pasajeros
Ciclo vías	Eventos, demoras, velocidad
Peatones	Espacio, eventos, demoras, velocidad

Al considerar las arterias urbanas, estas pueden ser clase I o clase II, para la primera clasificación la velocidad de recorrido es relativamente alta y no hay zonas de parqueo. A la clase II pertenecen las rutas de acceso a vías principales de nivel I. La caracterización de esta tipificación para cada nivel de servicio se señala en la tabla No.4,

Tabla 4 Nivel de servicio

Nivel de servicio	**Clase I**			**Clase II**
	% de tiempo consumido en seguimiento	Velocidad media de viaje (millas/hora)	Velocidad media de viaje (km/hora)	% de tiempo consumido en seguimiento
A	< = 35	> 55	> 90	< = 40
B	> 35 -50	> 50 – 55	> 80 – 90	> 40 – 55
C	> 50 – 65	> 45 – 50	> 70 – 80	> 55 – 70
D	> 65 – 80	> 40 – 45	> 60 – 70	> 70 – 85
E	> 80	< = 40	< = 70	> 85

Velocidad, razón de movimiento, en distancia por unidad de tiempo (km/h). La velocidad promedio de viaje, según el HCM 2000 se calcula dividiendo el largo de la carretera, sección o segmento bajo consideración entre el tiempo promedio de viaje de los vehículos que pasan por dicho segmento.

$$s = \frac{L}{ta}$$

Donde:

- S: Velocidad promedio de viaje [km/hr]
- L: Longitud del segmento de la carretera [km]
- ta: Tiempo promedio de viaje en el segmento [hr]

Al definirse dos tipos de flujos, continuo e interrumpido, siendo este último el que compete en la presente investigación, el manual de carreteras establece diferentes tipos de movilidad para cada corriente de tránsito,

> **Velocidad de punto de un vehículo**, es la velocidad v_p a su paso por un determinado punto o sección transversal de la carretera.
>
> **Velocidad instantánea de un vehículo**, es la velocidad v_i cuando se encuentra circulando a lo largo de un tramo de carretera en un instante dado.
>
> **Velocidad media temporal**, es la media aritmética de las velocidades de punto de todos los vehículos que pasan por un punto específico de una carretera durante un intervalo de tiempo seleccionado.
>
> **Velocidad media espacial**, es la media aritmética de las velocidades instantáneas de todos los vehículos que en un instante dado se encuentran en un tramo de carretera. Anónimo (Capacidad vial,2010, p.7)

Volumen o flujo, corresponde al número total de vehículos que pasan por un punto sección transversal o por un tramo de un carril o carretera durante un intervalo de tiempo dado; los volúmenes pueden expresarse en términos anuales, mensuales, semanales, diarios, horarios o en períodos inferiores a una hora. Se tiene así el tránsito anual (TA), el tránsito mensual (TM), el tránsito semanal (TS), el tránsito diario (TD), el transito horario (TH) y el tránsito en un período inferior a una hora (Q_i).

2.2. Análisis de carga vial

En el contexto de la construcción de las vías, pavimentación de las mismas, y el cálculo de los índices de contaminación, el análisis de carga vehicular se explica como un procedimiento necesario en todas las grandes ciudades del mundo (Cervera Gómez, 2015). La investigación cuantitativa relacionada con el análisis de la capacidad presenta un creciente desarrollo, desde diferentes enfoques, para esto existen diferentes formas y procedimientos, así como la propuesta de diferentes algoritmos, como lo plantea Rondón y Delgadillo se han implementado diversos sistemas para el cálculo de las cargas vehiculares, siendo los más utilizados aquellos que no requieren parar el tránsito (Rondón y Delgadillo 2014).

Dichos sistemas presentan una serie de ventajas técnicas, sin embargo, presentan una serie de desventajas tales como un alto costo de instalación y operación y presentan un alto grado de imprecisión (Prozzi & Hong, 2007, 2007a; Zhang et al., 2008).

Los análisis con respecto a la infraestructura siguen vigentes (Selman, 2012), pero se ha incluido otras tecnologías de reciente uso como GIS (Yi-lin & Kai-hua, 2014) y el análisis de detalles importantes para el comportamiento macro de los vehículos como los giros a derecha e izquierda y sus diferentes combinaciones (Yuchuan, Shanchuan, Xi, & Yu, 2015).

Rondón y Delgadillo plantean un modelo de placas de flexión que permite medir las cargas vehiculares, como una alternativa de solución económica y flexible, esto se logra mediante la utilización de materiales piezoeléctricos, los cuales también son denominados materiales inteligentes. A partir de este material se construye un sistema de sensores de vibraciones en el pavimento con el fin de obtener un alto grado de precisión en la medición de cargas vehiculares. (Rondon & Delgadillo 2014).

Actualmente se han analizado los enfoques de optimización en el análisis del tráfico (Sangsefidi, Rashidbenam, Kabiri, Amid, & Sangsefidi, 2015) (Wang & Wang, 2014).

Desde el punto de vista matemático existen una serie de relaciones que permiten aproximar a la medición de las cargas en un tramo o segmento de vía determinado. Urrego y Calderón plantean la siguiente relación: (Urrega y Calderon 2009):

$$Densidad\ \left[\frac{Vehiculos}{Km}\right] = \frac{Volumen\ \left[\frac{Vehiculos}{hora}\right]}{Velocidad\ \left[\frac{Km}{hora}\right]}$$

Ahora bien, la medición en tiempo real de los datos necesarios para este modelo y demás relaciones de tipo matemático plantean grandes retos a la ingeniería. (Urrega y Calderón 2009).

2.3. Modelos comportamiento vehicular

Existen varios modelos que pretenden explicar el fenómeno de tránsito en las diferentes carreteras e infraestructura viales existentes (Bellomo y Dogbe,2011). Sin embargo, existen dos de los anteriores que se pueden catalogar como los más representativos a la hora de describir el flujo vehicular. Vargas Uberra y Rodríguez Gomes en su artículo titulado "Monitoreo del tránsito vehicular basado en Mobile Phone Sensing" (Vargas-Uberra, Cuautepec, Rodríguez-Gómez, Pomares-Hernández,2000) definen de forma concreta y entendible los dos tipos de modelos: los modelos macroscópicos y los modelos microscópicos.

De manera global, en los modelos presentados a continuación la conducción se entiende como un proceso de control bidimensional. La primera dimensión, es la función lateral que permite relacionar frente a una observación previa su posición en un espacio, la segunda corresponde a la tarea longitudinal determina la velocidad según condiciones tanto psicológicas propias del conductor como las dadas por el entorno y su relación circunstancial con este (Egea, s.f)

El estudio de los modelos macroscópicos se basa en el estudio de variables colectivas, no es posible distinguir la individualidad de los vehículos.

Un modelo microscópico describe el tránsito en términos del comportamiento individual frente a diversas situaciones de conducción. Estos modelos se basan en las leyes estimulo-respuesta, donde la respuesta al cambio de rapidez se mide por la aceleración del vehículo como resultado de las acciones de los autos circundantes. El origen de los modelos microscópicos se remonta a los años sesentas y a partir de este surgimiento se han podido realizar diversas mejoras a los modelos existentes (Berg, Mason, Woods,2000)

No obstante, la principal dificultad que se presenta en este tipo de modelos radica en la gran cantidad de variables diferenciales obtenidas y la dificultad de resolución (Vargas-Uberra, et al,2000). Muchas son las variaciones de este tipo de modelos. El mismo autor propone un modelo con autómatas celulares, pero indica que existe un amplio campo de investigación tanto teórica como práctica en lo referente al flujo vehicular.

Por ejemplo, Velazco C. y Coeymans A. calibran un modelo microscópico denominado GETRAM a las condiciones de la ciudad de Santiago de Chile, es decir obtienen y validan los parámetros para la aplicación de este modelo en dicha ciudad a fin de adecuar el modelo GETRAM de simulación microscópica en el contexto de Chile, resaltando las diferencia geográficas y culturales del país donde se dio origen al modelo (Velasco, L. M.,2004).

Liu F propone uno de los trabajos más recientes, donde se contempla un nuevo modelo con una característica esencial: considera la diferencia de velocidad actual del coche que se está conduciendo y la velocidad histórica mediante análisis no lineal. Para lograr este objetivo utiliza ecuaciones dependientes del tiempo, que forman un modelo que tiene como fin la representación del flujo vehicular y es validado mediante simulación (Liu, F., Cheng, Ge, H., y Yu, C. 2016).

De manera análoga, Guanghan Peng plantea un análisis no lineal considerando el efecto óptimo de la diferencia de velocidad media global sobre la base del modelo de la diferencia de velocidad completa. Esto logra considerarse a partir del modelado con optimización, sin tener en cuenta el conjunto de tradiciones, hábitos, costumbres y creencias, que difieren en cada red de tráfico vehicular (Peng, G., Lu, W., & He, H. 2016).

Uno de los conceptos más interesantes de aplicar en el modelado del comportamiento vehicular tiene que ver con la racionalidad limitada del conductor. Tie-Tang Qiao, propone un modelo de flujo vehicular para el cálculo del costo final del viaje teniendo en cuenta la racionalidad limitada de cada conductor, y como resultado obtiene que al tener en cuenta dicha condición mejorará su funcionamiento de costos en el sistema y en el modelo usado (Tang Tie-Qiao,2009).

Vargas Uberra permite identificar un modelo macroscópico como una analogía entre la dinámica de fluidos y una línea de vehículos en movimiento, identificando de forma general tres tipos de variables: la densidad, el flujo y la velocidad promedio (Vargas&Uberra,2016).

Entendiendo la densidad como la cantidad de vehículos en un lugar, la velocidad como la cantidad de vehículos en un determinado intervalo de tiempo y, por último, el flujo comprendido como la cantidad de vehículos que pasan por un determinado sitio y en un intervalo de tiempo.

Las mencionadas variables permiten simplificar las condiciones reales, reduciendo las reacciones psicológicas del conductor en dos tareas básicas, a fin de facilitar su representación en los diferentes métodos que han sido planteados para proyectar el comportamiento vehicular en una vía.

Se finaliza la construcción del marco referencial abordando la herramienta a utilizar en la presente investigación: la simulación basada en agentes.

2.4. Simulación basada en agentes

La simulación basada en agentes constituye una herramienta útil para la investigación de fenómenos de orden social (Canessa & Quezada,2007) considerando la complejidad, no linealidad, emergencia y externalidades no intencionadas típicas en las manifestaciones de colectivos. Para el año 1999 los autores Gilbert y Troitzsch referencian el modelado de fenómenos sociales con autómatas celulares, mediante una simulación computacional abonando interacción y cercanía de celdas en un tablero, siendo cada celda un autómata.

Con el desarrollo de esta técnica se deriva el concepto de agente, que, a diferencia del autómata, presenta conexiones de tipo sociales más complejas, permitiendo representar conductas de un individuo que responde a variaciones en su entorno de acuerdo a una estructura mental formada (Arroyo, 2006)

La ejecución de un modelo basado en agentes implica de manera positiva la interdisciplinariedad en la investigación, además de brindar una predicción más cercana del sistema real al considerar el impacto de un individuo en una estructura social facilitando el entendimiento del fenómeno a niveles macro y microscópicos, resaltando a su vez, la dificultad en la verificación y validez de los resultados arrojados al tratar manifestaciones sociales cuyas formas de investigación, en algunos casos, son empíricas (García-Valdecasas,2011).

2.4.2. Validación modelos de simulación

La verificación y validación de los modelos de simulación consisten en las etapas de aceptación de lo planteado en la investigación (aguilar,1997), se entiende como verificación, el proceso en el cual se interpreta el modelo matemático en el marco del fenómeno investigado a fin de comprobar que la representación usando lenguaje especifico o un entorno de simulación se aproxime al objeto de investigación.

Algunos procedimientos que comprenden la verificación de un modelo son (Urquia,2013)

- Verificación manual de la lógica
- Comprobación de sub modelos
- Comprobación con soluciones conocidas
- Test de sensibilidad

El objeto de esta serie de procedimientos es identificar que tan cercano es modelo con el fenómeno real, mediante la comparación de resultados con soluciones ya implementadas o con la variación de parámetros de la simulación para observar la influencia en el modelo desarrollado. La etapa de validación consiste en determinar, generalmente con tratamiento estadístico, el nivel de confianza en el que se encuentran los datos ingresados a la simulación y los resultados de esta, identificando el impacto que tienen las diferencias entre el modelo y el sistema real en lo obtenido en la simulación.

3. ESTADO DEL ARTE

El problema de la congestión es un tema común en las grandes urbes más la comprensión de las causas de este fenómeno abarca gran cantidad de disciplinas y las consecuencias del mismo se extienden hasta propiciar desmejoras en la calidad de vida (Bull,2012), debido al factor humano y las características propias de los sistemas sociales como la no linealidad, emergencia y externalidades no intencionada (García-Valdecasas,2011), el estudio de la movilidad y en específico, el del comportamiento vehicular presenta un alto grado de complejidad. A fin de lograr aproximaciones al tema, el estudio del comportamiento vehicular se aborda desde dos perspectivas, la primera es un nivel macroscópico (Lebacque,2005) donde el análisis se centra en variables generales las cuales se soportan en un modelo microscópico (Yang Q.,1996) que consiste en la observación detallada de las variables y sus respectivas interacciones, establecidas en el modelo macroscópico (Chakroborty,2006) (Velasco,2004).

Respecto a los modelos microscópicos, la evaluación de estos modelos se soporta en la identificación de dos tareas bidimensionales básicas por parte del individuo: control de la posición a lo largo y ancho de la carretera (Mathew,2011), la importancia de estas dos tareas y las variables que influyen sobre estas establecen la variedad de enfoques en la investigación del comportamiento individual frente a situaciones emergentes de la conducción, por lo que el presente artículo pretende, tras la revisión de literatura existente, dimensionar el estado del arte en comportamiento vehicular. Dos de los modelos representativos del comportamiento vehicular, parten de la priorización de las tareas bidimensionales mencionadas, el control longitudinal se prioriza en la realización de modelos tales como, free-flow behaviour (Chakroborty,2006) donde no hay interacción entre vehículos, por lo que el conductor puede decidir y mantener una velocidad, el siguiente modelo y cuya representación ha sido relevante en los estudios de los últimos dos siglos, es el modelo car-following (Delgado,2011) (Leutzbach, 1988) el cual relaciona dos sensaciones que dominan al conductor, urgencia y velocidad, partiendo de una visión más microscópica del comportamiento, además el planteamiento de estos modelos se realiza bajo el supuesto de dos tipos de posibles entornos, el primero de estos un flujo ininterrumpido cercano a las

condiciones expuestas en el free-flow behaviour y el escenario contrario, el flujo interrumpido (Türker,2005).

Para gran parte de la población la conducción se ha convertido en un hábito, considerando el aumento del 4,1% en el parque automotor mundial pasando a un total de más de 1.200 millones de coches en circulación, según los cálculos de la OICA, por esta razón se hace prioritario el incluir el factor humano (Zhang,2016) (Yang,2016) (Ball,2013) y las implicaciones que derivan la compleja interacción del individuo en un sistema (Vargas-Uberra,2016) y más aún generar herramientas de análisis que permitan aproximarse a un modelo que describa de forma satisfactoria el impacto del factor humano en la movilidad, visualizándolo como factor clave en la solución a la congestión vial de las grandes urbes en la actualidad.

Dentro del estudio del comportamiento vehicular son varios los modelos cuyo objetivo es explicar el fenómeno del tránsito en entornos con diferentes características, sin embargo, se distingue la investigación a nivel macroscópico (Velasco,2017) y a nivel microscópico (Chakroborty,2006) (Leutzbach,1988). los modelos macroscópicos se pueden entender como una analogía entre la dinámica de fluidos y una línea de vehículos en movimiento (Tang Tie-Qiao,2009) las variables que se consideran son la densidad, el flujo y la velocidad promedio (HCM, 200), variables que a su vez integran el concepto de capacidad vial y la relación fundamental del tráfico.

Los problemas que se buscan solucionar con análisis de parámetros macro del trafico varían entre predecir tiempos de viajes hasta la estimación de la capacidad de una vía. Dentro de los modelos representativos las técnicas matemáticas y estadísticas son las más utilizadas (Spiliopoulou,2015), como en el modelo de descripción de la secuencia el cual parte de la relación fundamental proponiendo una relación logarítmica basada en las analogías de flujo de fluidos al flujo vehicular.

Por su parte los modelos microscópicos atienden a la individualidad de los vehículos permitiendo analizar escenarios de forma detallada discurriendo en factores conductuales y culturales del conductor. El objetivo de los modelos a nivel microscópico responde a la necesidad de entender la elección del conductor, bajo ciertos criterios, en situaciones tales

como condiciones de flujo libre (Ranjitkar,2000), situaciones de cruce de rutas, rotondas o intersecciones (Berg,2000).

El origen de los modelos microscópicos se remonta a los años sesentas y a partir de este surgimiento se han podido realizar diversas mejoras a los modelos existentes (Filippini,2017). Aun así, en modelos representativos del nivel macroscópico, es visible la simplificación del comportamiento y el establecimiento de condiciones alejadas de las reales, representando esto la principal dificultad que se presenta en este tipo de modelos: la gran cantidad de variables diferenciales obtenidas (Yang B.,2016) (Li, Y,2013) y la dificultad de resolución (Tang Tie-Qiao,2009). Muchas son las variaciones de este tipo de modelos y en general, atienden a las condiciones ya señaladas. En este marco es visible el amplio campo de investigación tanto teórica como práctica en lo referente al flujo vehicular.

Por ejemplo, el modelo free-flow behaviour considera un escenario donde un conductor no se ve afectado por vehículos próximos, por lo que el espaciamiento entre estos se mantiene a una distancia donde ninguno representa un obstáculo para el otro y donde la velocidad deseada es la velocidad promedio del recorrido, por el contrario, el modelo de car-following (Siuhi,2010) uno de los más representativos, parte del supuesto de la conducción como un proceso humano (Tang Tie-Qiao,2009) , considerando un umbral perceptual como lo es el mantener una velocidad constante o identificar variaciones leves de aceleración o en la distancia; esta propiedad a dado paso al planteamiento de conceptos interesantes de aplicar en el modelado del comportamiento vehicular como el de la racionalidad limitada del conductor. Tie-Tang Qiao, propone un modelo de flujo vehicular para el cálculo del costo final del viaje teniendo en cuenta la racionalidad limitada de cada conductor, y como resultado obtiene que al tener en cuenta dicha condición mejorará su funcionamiento de costos en el sistema y en el modelo usado (Liu, F.,2016).

Respecto a la velocidad desde una perspectiva microscópica y apropiando la limitación perceptual del ser humano Liu F propone uno de los trabajos más recientes, donde se contempla un nuevo modelo con una característica esencial: considera la diferencia de velocidad actual del coche que se está conduciendo y la velocidad histórica mediante un análisis no lineal, utilizando ecuaciones dependientes del tiempo, que forman un modelo que tiene como fin la representación del flujo vehicular y es validado mediante simulación (Peng, G.,2016).De manera análoga, Guanghan Peng plantea un análisis no lineal considerando el

efecto óptimo de la diferencia de velocidad media global sobre la base del modelo de la diferencia de velocidad completa (Lee HW,2003).

Otros modelos, combinan supuestos de los modelos generales de free-flow behaviour y car-following (Treiber,200) (Davidysson,2016) (Vegni,2015) como pipe´s model que sugiere que la distancia mínima que un conductor percibe aumenta linealmente con la velocidad deseada, de igual manera la distancia mínima puede ser apreciada por el conductor si la velocidad promedio de recorrido es alta o baja, o como en el Forbe´s model el tiempo de reacción del vehículo frente a la condición del vehículo líder.

A su vez los modelos microscópicos tienen en cuenta las características del entorno, como se muestra en el trabajo de Velazco C. y Coeymans A. quienes calibran un modelo microscópico con la herramienta GETRAM a las condiciones de la ciudad de Santiago de Chile, es decir obtienen y validan los parámetros para la aplicación de este modelo en dicha ciudad a fin de adecuar el modelo GETRAM de simulación microscópica en el contexto de Chile, resaltando las diferencia geográficas y culturales del país donde se dio origen al modelo (Mathew,2011).

3.1.Propiedades sociales en las redes vehiculares

Como una nueva perspectiva el termino redes sociales vehiculares (Cunha,2016) (X. Liu,2012) (Travieso,2007) ha tenido acogida en el contexto académico y practico, aplicaciones como waze, Google Maps (Fiore,2008) entre otras son ejemplo de la interacción de los vehículos en una vía como solución parcial a problemas de movilidad urbana. El soporte de este nuevo campo de investigación es la influencia de la respuesta del conductor a una serie de posibles acontecimientos que se puedan presentar al conducir bajo el marco de condiciones que propicien el intercambio de información entre vehículos.

Entre los trabajos representativos de las redes sociales vehiculares se encuentran métricas de redes complejas (Loulloudes,2010) como el coeficiente de agrupamiento (Rezende,2011) (Newman,2002), vértices representando la cantidad de intersección del área geográfica delimitada, que puede ser un escenario analítico o una ubicación real, con una población definida en la literatura como “mundo pequeño” (Thakur,2013), expresión en la cual se

define la premisa de una interacción mínima de 5 a 6 personas en un vértice central por vehículo circulante.

Los resultados arrojados de la observación de los parámetros mencionados señalan la tendencia de los vehículos a formar comunidades en las que se comparten rutinas similares, como rutas y horarios, además de intereses comunes (Cunha,2016).

A modo de conclusión tras la revisión del estado del arte en el comportamiento vehicular se destacan los modelos de *free-flow behaviour* y *car-following* como los modelos base de gran parte de la producción académica en el campo del comportamiento vehicular resaltando la inclusión de variables del comportamiento individual y la innovación en técnicas de análisis o recolección de datos en estos recientes trabajos.

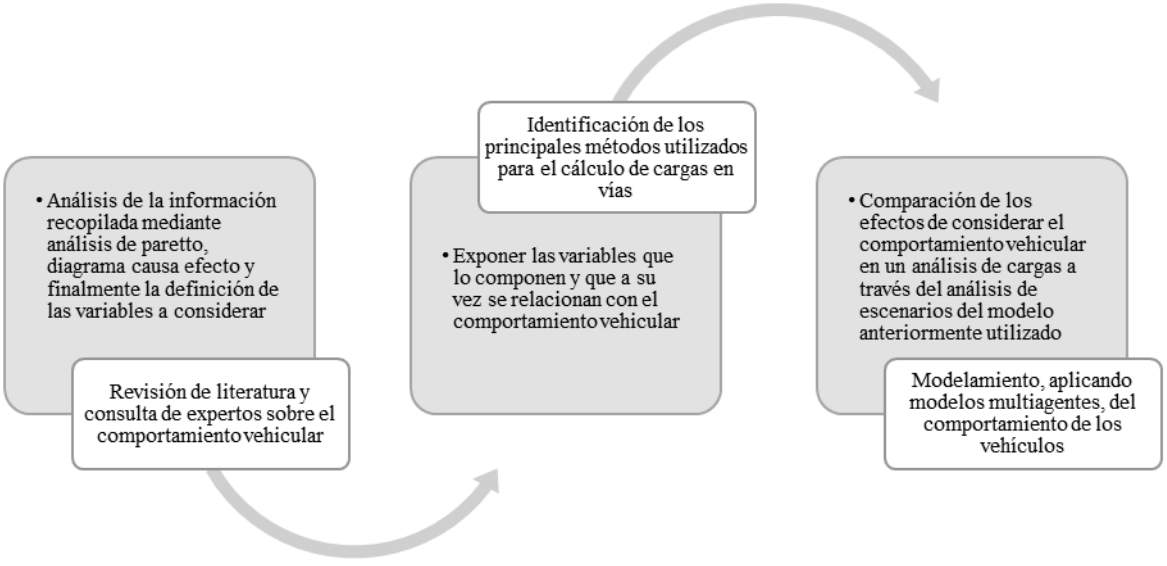
Finalmente se señala la necesidad de incluir una perspectiva de orden social en los estudios de movilidad, abordando el comportamiento individual del vehículo a fin de identificar su impacto en la congestión vehicular, permitiendo el planteamiento de estrategias adecuadas que generen una movilidad sostenible.

4. METODOLOGÍA

La metodología a seguir para la realización del presente proyecto se compone de, en primera instancia, la revisión de literatura y consulta de expertos sobre el comportamiento vehicular, para proceder al análisis de la información recopilada mediante análisis de Paretto, diagrama causa efecto y finalmente la definición de las variables a considerar.

Seguido de esto, la identificación de los principales métodos utilizados para el cálculo de cargas en vías a fin de exponer las variables que lo componen y que a su vez se relacionan con el comportamiento vehicular, considerando lo resumido en la revisión de literatura y de expertos.

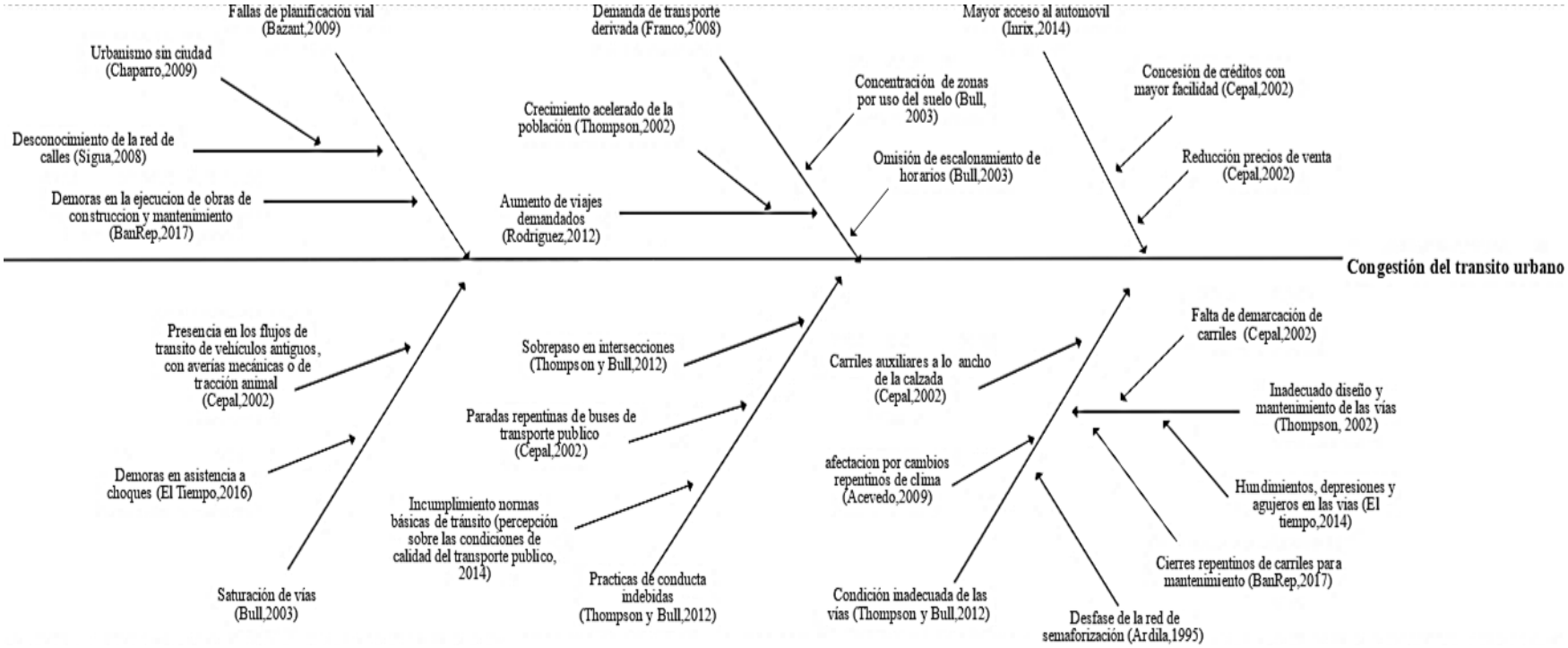
Como tercera fase, la delimitación del alcance de la investigación proyectada en la ciudad de Bogotá, identificando horizonte de tiempo y especificación de la zona, para continuar con el modelamiento, aplicando modelos multiagentes, del comportamiento de los vehículos. Por último, se concluye con la comparación de los efectos de considerar el comportamiento vehicular en un análisis de cargas a través del análisis de escenarios del modelo anteriormente utilizado.



Gráfica No 6 Metodología de investigación

3.1.Identificación y relación de variables

Se presenta a continuación, en la gráfica No.7 la identificación de variables a considerar tras la recopilación y análisis de información



Grafica No 7 Variables que influyen en el comportamiento vehicular. Fuente: Propia

La congestión vehicular se puede entender como la principal manifestación de problemas asociados con la movilidad en una ciudad (Bull,2003) por lo que se considera como la consecuencia principal de una serie de desaciertos en la planeación y administración de la malla vial (Bazant,2009) (Prajakta,2011), de comportamiento discorde a las normas básicas por parte de los actores que integran el concepto de tránsito (Alcântara,2010) y estado inadecuado de las vías (Thompson&Bull,2012). A su vez las consecuencias de los atascamientos en vías comprenden desde aumento en los tiempos de viaje, deterioro de la calidad del aire, contaminación auditiva (CEPAL,2002) (Galeno,2016) entre otros.

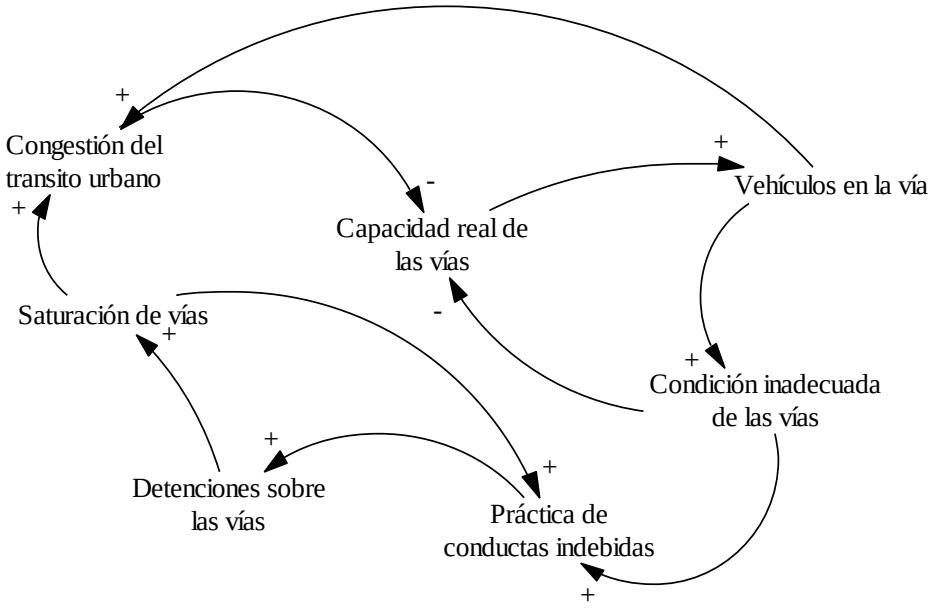
El embotellamiento en el transito urbano es principalmente causado por el aumento de vehículos en la vía (Inrix,2014), siendo esta una de las causas de primer nivel identificada, este fenómeno deriva un crecimiento poblacional, para el caso de Bogotá, representado no solo en el incremento de la tasa de natalidad, también producto de las situaciones de violencia que concluyen en gran parte, en la migración a las grandes urbes (Gomez,2008).

La gestión de diferentes actores competentes enfocada a mejorar la movilidad en el distrito capital representa a su vez una causa para la congestión del tránsito urbano, las constantes demoras en la construcción o mantenimiento de las vías (BanRep,2017) implican condiciones inadecuadas de la malla vial, tales como la demarcación de los carriles o el estado del pavimento reduciendo notablemente la capacidad real de la vía (Acevedo,2009) o los atascamientos producto de los cambios climáticos repentinos, debido a la lluvia acumulada sobre las calzadas (CEPAL,2002) (Aathira,2015). Las medidas adoptadas abarcan a su vez concientización por parte de peatones y conductores sobre la práctica de conductas inadecuadas (Álboran,2005).

Dentro de esta causa, cabe resaltar el papel del transporte público al incorporar gran parte de comportamientos vehiculares que contribuyen a los atascamientos en tramos de vías, como ejemplo, las paradas repentinas, las bajas velocidades en horas especificas del día donde la demanda del servicio es poca, también influye el estado de la flota cuyos vehículos son antiguos o se encuentran sin la correcta revisión técnica y el sobrepaso en intersecciones (CEPAL,2002).

Tras la revisión de los principales métodos utilizados para el cálculo de cargas en vías en el desarrollo del marco teórico y la identificación de las variables a considerar del

comportamiento vehicular, se procede a relacionar lo anterior considerando lo resumido en la revisión de literatura y de expertos como se muestra en la gráfica No.8.



Grafica No 8 Relación de variables que influyen en el comportamiento vehicular. Fuente: Propia

Como resultado del analisis de causalidad de las variables que influyen en el comportamiento vehicular se identifican tres ciclos.A nivel general, la capacidad real de las vias se puede reducir notablemente debido a las variables identificadas previamente, al considerar un aumento poblacional de forma proporcional se genera una mayor demanda de viajes a realizar (Franco,2008)(Rodriguez,2012), considerando el caso especifico del Distrito capital, la satisfaccion de los usuarios de transporte publico es del 19% frente a un nivel de 48% obtenido en el año 2008 (Encuesta de percepción ciudadana,2015) lo que deriva en el aumento del uso de vehiculo particular (Registro Distrital Automotor, 2015) (Vishwajeet,2016) incrementando la movilidad en vías principales según su uso de suelo (Vishwajeet,2016) en determinadas horas del día (Bull,2003) y generando a su vez un alto grado de saturación de vías, ya que un automóvil produce once veces la congestiona atribuible a cada pasajero de transporte público (Ardila,1995).

El incremento de vehículos particulares en la vía produce a su vez el deterioro de la malla vial (CEPAL, 2002) (Inrix,2014), en las localidades como Suba, Bosa y Barrios unidos la afectación de los kilómetros por carril supera el 30% (Registro Distrital Automotor, 2015). La condición inadecuada de las vías o tramos de estas produce, tanto en peatones como conductores practica de conductas indebidas (Aathira, 2015), tales como sobrepaso en intersecciones, cambios de carril repentinos entre otros incumplimientos a normas básicas de tránsito (Thompson y Bull, 2012).

La práctica de conductas indebidas por parte de los conductores origina detenciones en la vía (Vishwajeet,2016) (Álboran,2005)., generalmente por choques, en Bogotá paralelo al aumento de vehículos en la vía, los accidentes de tránsito ascendieron un 15% para muertes y 28% para lesiones frente al histórico del año 2013 (Observatorio de seguridad, 2014), se considera de igual manera, las constantes demoras en el momento de asistir a un choque en una vía (El tiempo, 2016).

Para la administración nacional y/o local, la dificultad de contrarrestar el aumento del parque automotor implica una serie de acciones a ejecutar en unas condiciones demográficas y geográficas ya establecidas, es allí donde el termino urbanismo sin ciudad (Pineda, 1967) (Chaparro,2009) entra en consideración, puesto que la planeación vial se recrea en un entorno poco adecuado al contexto real haciendo visibles fallas en la administración y planificación vial (Chaparro, 2009) (Prajakta,2016), donde se presenta desconocimiento de las políticas, de las condiciones de transito incluyendo la red de calles, por parte de los usuarios tanto de servicio público como particular (Sigua,2008) aportando a su vez a la saturación de vías (Rodriguez,2012).

3.2.Análisis del comportamiento vehicular

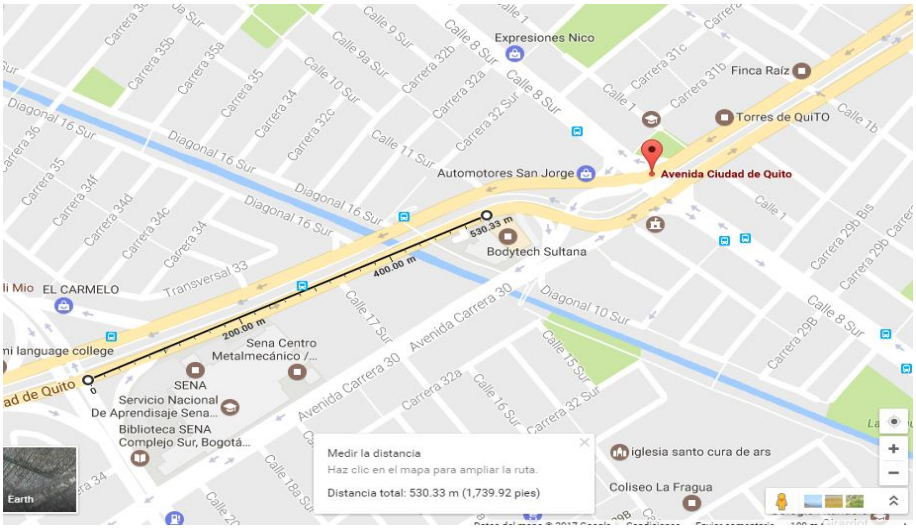
Como tercera instancia de la metodología se procede a analizar la intersección a modelar, para lo cual se realiza la distinción de dos comportamientos por parte de los conductores: agresivo y pasivo, siendo estas la tipología de agente a modelar. A partir de la revisión bibliográfica y de la observación realizada en las pruebas de campo se analizaron las siguientes características del comportamiento vehicular en la intersección objeto de estudio:

Las variables a evaluar para la clasificación de los vehículos particulares en la intersección son:

- **Velocidad**: según el código de tránsito de Colombia, la velocidad máxima permitida en una intersección o en proximidades a esta es de 30 km/hr.

> ARTÍCULO 74. REDUCCIÓN DE VELOCIDAD. Los conductores deben reducir la velocidad a treinta (30) kilómetros por hora en los siguientes casos:
>
> En lugares de concentración de personas y en zonas residenciales. En las zonas escolares. Cuando se reduzcan las condiciones de visibilidad. Cuando las señales de tránsito así lo ordenen. En proximidad a una intersección. (Código de tránsito de Colombia, 2002)

Metodología de estimación: la estimación de la velocidad se realizó a partir de la información de la longitud del tramo de la vía observado por el tiempo que tarda en atravesar dicho tramo el vehículo. Los datos de longitud de cada acceso de la intersección se obtuvieron de la aplicación Google Maps como se muestra en la gráfica No.9.



Grafica No 9 medición distancia tramo analizado. Fuente. Google Maps

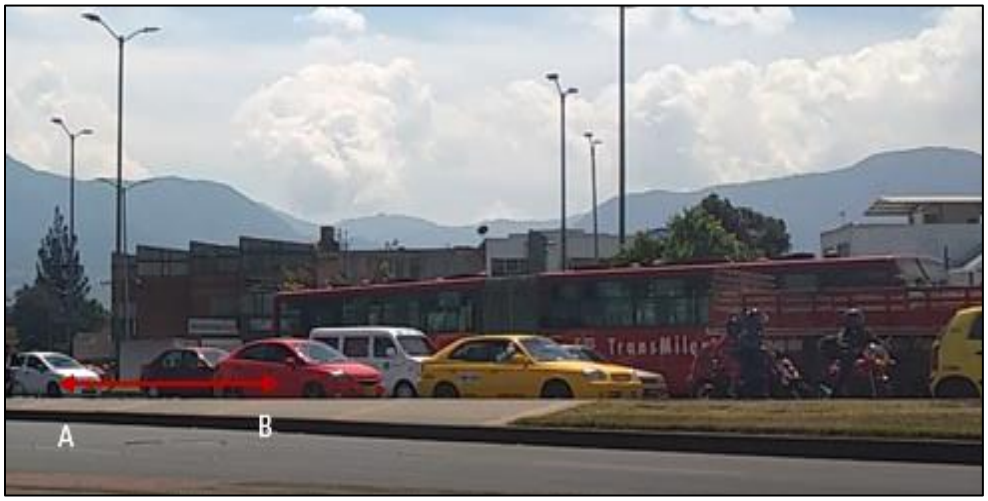
- **Infracciones según el modelo del vehículo:** Con la creación del portal web datos abiertos: https://www.datos.gov.co/ el gobierno colombiano puso a la disposición de los ciudadanos datos referentes a una serie de temáticas, con fines investigativos y académicos. Una de estas temáticas tiene que ver con los comparendos impuestos en

la ciudad de Bogotá durante el año 2015. A partir de esto se pueden filtrar cuales son las infracciones más frecuentes por los conductores bogotanos.

La denominada sanción C2 del código nacional de tránsito “estacionar en sitios prohibidos”, es la infracción más cometida por los conductores bogotanos, seguido de la sanción C35 “Revisión técnico mecánica vencida”. Es claro que los vehículos que no cumplen con la revisión técnico-mecánica ponen en peligro la integridad de todos los actores en la vía. Aproximadamente 5065 (fuente propia de datos Colombia) conductores fueron multados por no tener esta revisión al día.

Metodología de estimación: abstracción de los datos de https://www.datos.gov.co/sobre comparendos.

- **Espaciamiento entre vehículos**: por normativa, a una velocidad de 30 kilómetros por hora, un vehículo debería distanciarse por lo menos 10 metros con el vehículo que va delante de él; con una velocidad entre 30 y 60 kilómetros por hora, los vehículos deben distanciarse 20 metros. Entre 60 y 80 kilómetros por hora, la distancia entre automóviles debería ser de 25 metros y a más de 80 kilómetros por hora un vehículo debería detenerse 30 metros antes del vehículo que lo precede. (SURA, 2013)



Gráfica No 10 Espaciamiento entre vehículos. Fuente. Propia

Metodología de estimación: para el cálculo del espaciamiento entre vehículos se estableció una escala para los fotogramas analizados, luego se realizó la medición entre el vehículo analizado y el que en el momento lo precedía (grafica No.10).

- **Tiempo de reacción:** Es visible que los diferentes tiempos de reacción de los conductores frente al cambio de semáforo (verde-amarillo-rojo) genera cruces con los vehículos de los otros accesos, fenómeno que se observa en la gráfica No.11



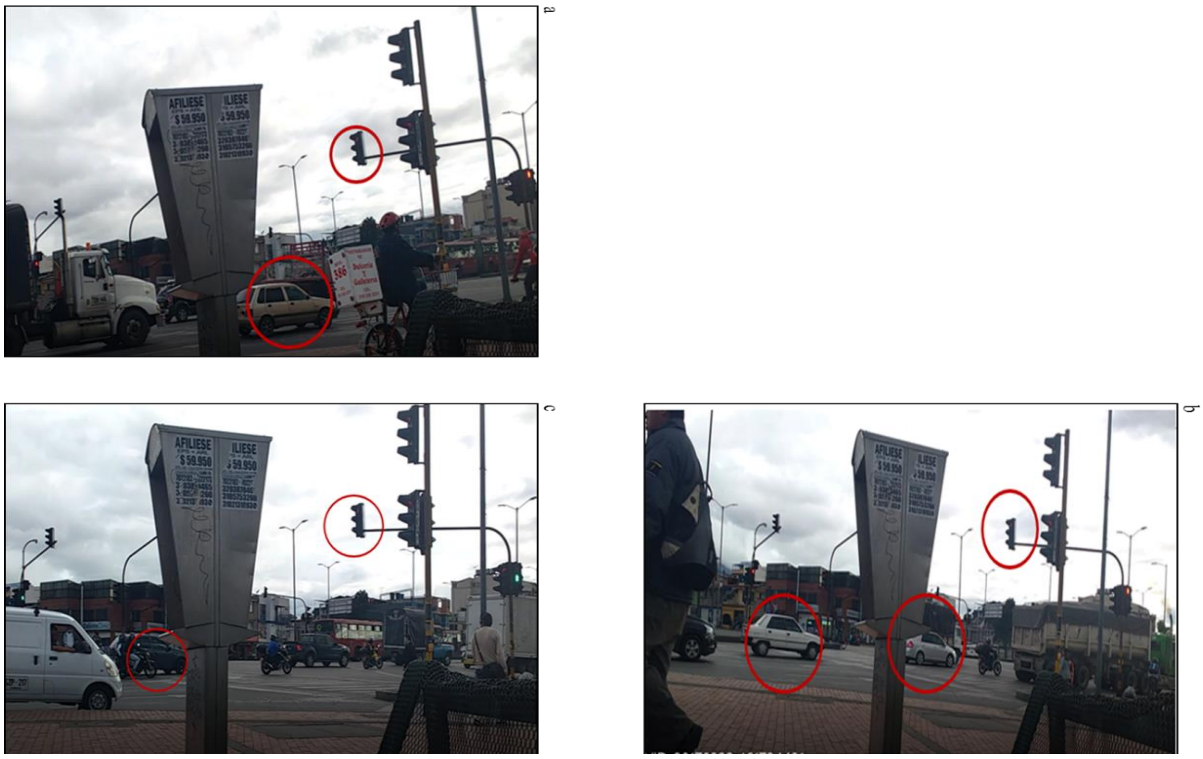
Gráfica No 11 cruce vehículos diferentes accesos Fuente. Propia

Considerando a su vez, como se observa en la gráfica No. 11, que el pelotón de vehículos del acceso oriente-occidente es mayor al que en promedio debería aprovechar el ciclo de semáforo por lo que en las situaciones en las que se presenta cruce se pudo estimar una disminución en los vehículos del acceso norte-sur que aprovechan el ciclo de semáforo como se presenta en la tabla No.5.

Tabla 5 tamaño promedio de pelotón acceso norte-sur

HORA	CRUCE	TAMAÑO DE PELOTÓN
Valle	Si	73
	No	83
	Si	82
	No	88
	No	80
Pico	Si	71
	No	79
	Si	73
	Si	67
	No	83

El tamaño de pelotón que aprovecha la luz verde del semáforo varía entre algunas causas, a raíz del sobrepaso de vehículos en luz roja, como se evidencia en la gráfica No.12. es también visible el irrespeto por la cebra peatonal por parte de los vehículos.



Gráfica No 12 sobrepaso de vehículos en semáforo en rojo

Acorde con la velocidad deseada para transitar por parte del conductor, este puede intensificar prácticas de conductas indebidas tales como los cambios de carril y adelantar a otros vehículos en zonas de prohibiciones especiales (European Conference of Ministers of Transport, 2009)

Metodología de estimación: para el cálculo de esta variable se cronometro el tiempo transcurrido entre el cambio de luz del semáforo y el arranque del auto más rápido y del ultimo en dar marcha que se ubiquen de primeros en cola.

- **Sobrepaso de vehículo**s:

> Artículo 73. *Prohibiciones especiales para adelantar otro vehículo.* No se debe adelantar a otros vehículos en los siguientes casos:

En intersecciones. En los tramos de la vía en donde exista línea separadora central continua o prohibición de adelantamiento. En curvas o pendientes. Cuando la visibilidad sea desfavorable. En las proximidades de pasos de peatones. En las intersecciones de las vías férreas. Por la berma o por la derecha de un vehículo. En general, cuando la maniobra ofrezca peligro.

Metodología de estimación: corresponde a la estimación visual de las tomas de video efectuadas.

a  b 

Gráfica No 13 sobrepaso de vehículos. Fuente. Propia

Para las variables tales como cambios de carril, respeto por la cebra y por el semáforo se siguió la misma metodología de sobrepaso de vehículos, la estimación visual mediante los videos tomados a diferentes horas del día.







Gráfica No 14 cambios de carril. Fuente. Propia

Los parámetros anteriormente mencionados y recopilados en la tabla No. 6, no son independientes y la aparición de uno de estos fenómenos suele generar otro, partiendo de la velocidad deseada del conductor este puede mantener una velocidad mayor o menor a la que indica la normativa (Bosch, 2003), en este caso 30 km/hr, dependiendo de la velocidad a la que se esté movilizando el vehículo la distancia de frenado determinara el espaciamiento con el vehículo que lo precede en la vía.

El tiempo de reacción de los vehículos frente al cambio de luz del semáforo da paso a cruces con los vehículos que vienen de otro acceso de la vía, específicamente el cruce de norte a sur y de occidente a oriente, para, según lo observado, generar un intento o un cambio de carril al pasar el cruce de las vías en las desviaciones a la avenida NQS o a la carrera 30.

Tabla 6 Variables del comportamiento vehicular

Variables del comportamiento vehicular
Velocidad
Espaciamiento entre vehículos
Tiempo de reacción
Cambios de carril
Infracción según el modelo
Sobrepaso de vehículos
Respeto por el cambio de semáforo
Respeto por la cebra

Aunque el alcance del presente trabajo es el comportamiento vehicular, el objetivo del mismo es la aproximación más cercana al fenómeno por lo que, para la distinción de la raza de agentes acá presentada se resalta la influencia que tienen las conductas inapropiadas por parte de peatones, ciclistas y motociclistas. Las infracciones observadas en el trabajo de campo respecto a los actores mencionados fueron el sobrepaso en luz roja, el zigzagueo en la vía y el irrespeto por la cebra peatonal como se observa en la gráfica No. 15



Gráfica No 15 infracciones motocicletas.

Respecto a los ciclistas, como se observa en la gráfica No. 16 se presenta de manera frecuente la omisión de la luz roja del semáforo, además de la circulación por la vía aun con ciclo vías en el sector



Gráfica No 16 infracciones ciclistas

Incumpliendo con el capítulo 5 del código de transito colombiano, en donde se establece

> Artículo 94°.Normas generales para bicicletas, triciclos, motocicletas, motociclos y MOTOTRICICLOS. Los conductores de bicicletas, triciclos, motocicletas, motociclos y mototriciclos, estarán sujetos a las siguientes normas:
>
> Deben transitar por la derecha de las vías a distancia no mayor de un (1) metro de la acera u orilla y nunca utilizar las vías exclusivas para servicio público colectivo. Los conductores que transiten en grupo lo harán uno detrás de otro.

4. ANÁLISIS DE ENTRADA

4.1.Cálculo de la muestra

Uno de los aspectos más importantes para realizar una simulación de forma exitosa, tiene que ver con el muestreo adecuado del fenómeno a simular, es decir la obtención de información que represente el comportamiento estadístico de aquello que se está estudiando. (Hillier& Liberman, 2010). Es por esto que conseguir una colección de datos que representen de forma adecuada la forma como se comportan los conductores es de vital importancia para este estudio.

El primer aspecto a tener en cuenta para el cálculo de la muestra tiene que ver con la población a analizar. Según cifras suministradas por el Ministerio de Transporte Bogotá cuenta con un parque automotor de 1’772.544 vehículos particulares, de los 12’600.000 que se movilizan por todo el territorio nacional. (El espectador, 2016).

Ahora bien, dado que la población es finita y teniendo en cuenta las condiciones del estudio a realizar, se utilizará la relación propuesta por George C. Canavos para el cálculo del tamaño de la muestra de una población finita (Canavos 1987). Descrita por la siguiente igualdad:

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^{2} * p * q}{d^{2} * (N-1) * Z_{\alpha}^{2} * p * q}$$

Donde:

- N: Representa el tamaño de la población
- Z_{α}: Es el valor aproximado del punto percentil 97.5 de la distribución normal
- p: proporción esperada
- d: precisión

Reemplazando los datos propios de la investigación resulta:

$$n = \frac{1666191 * (1.96^{2}) * (0.05) * (0.95)}{(0.01^{2}) * (1666191-1) * (1.96^{2}) * (0.05) * (0.95)}$$

Donde el tamaño de la muestra máximo es de 1900 vehículos

4.2.Variables

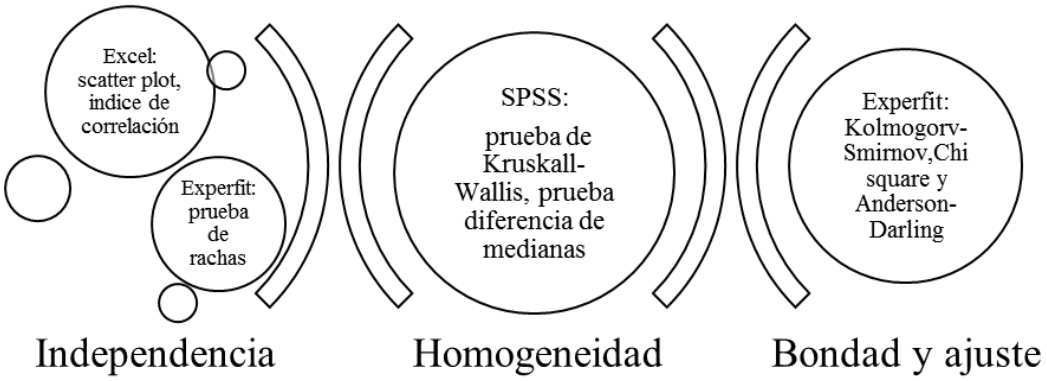
Tras el análisis realizado con base a las variables del comportamiento vehicular se presenta a continuación, en la tabla No.7, las variables a las que se les procedió a realizar el tratamiento estadístico para garantizar las propiedades necesarias para definirlas como variables aleatorias del sistema.

Tabla 7 variables del comportamiento vehicular: análisis de entrada

Variables del comportamiento vehicular
Velocidad
Espaciamiento entre vehículos
Tiempo de reacción
Tiempo entre arribos

4.3.Tratamiento y análisis de datos

Para la validación de los datos sobre los cuales se realiza la definición de los agentes se procede al tratamiento estadístico consistente en prueba de independencia, prueba de homogeneidad y bondad y ajuste (Grafica No.17) para las variables de velocidad, espaciamiento entre vehículos, tiempo de reacción y tiempo entre arribos, las anteriores variables clasificadas por acceso y por raza del agente, a excepción de los tiempos de arribo, tras la toma en campo de los mismos (Ver Anexo A).



Grafica No 17 tratamiento estadístico. Fuente propia

4.3.1. Pruebas de independencia

A continuación, se presenta el resultado de las pruebas de independencia a la muestra de cada acceso. Las pruebas que practicaron fueron prueba de rachas, nube de puntos e índice de representación, las anteriores se realizaron en el software Expertfit de Flexsim y en Excel (Ver anexo B). Para el caso de las pruebas de rachas y de homogeneidad se consideran ciertas abreviaciones de las variables, las cuales se presentan en la tabla No.8:

Tabla 8 abreviaciones variables de entrada

Abreviación	Definición
V1	Velocidad vehículo pasivo
V2	Espaciamiento vehículo pasivo
V3	Tiempo de reacción vehículo pasivo
V4	Velocidad vehículo agresivo
V5	Espaciamiento vehículo agresivo
V6	Tiempo de reacción vehículo agresivo

4.3.1.1.Tiempo entre arribos

El resultado de la prueba de rachas para el conjunto de datos correspondientes a tiempo entre arribos se presenta en la tabla No.9

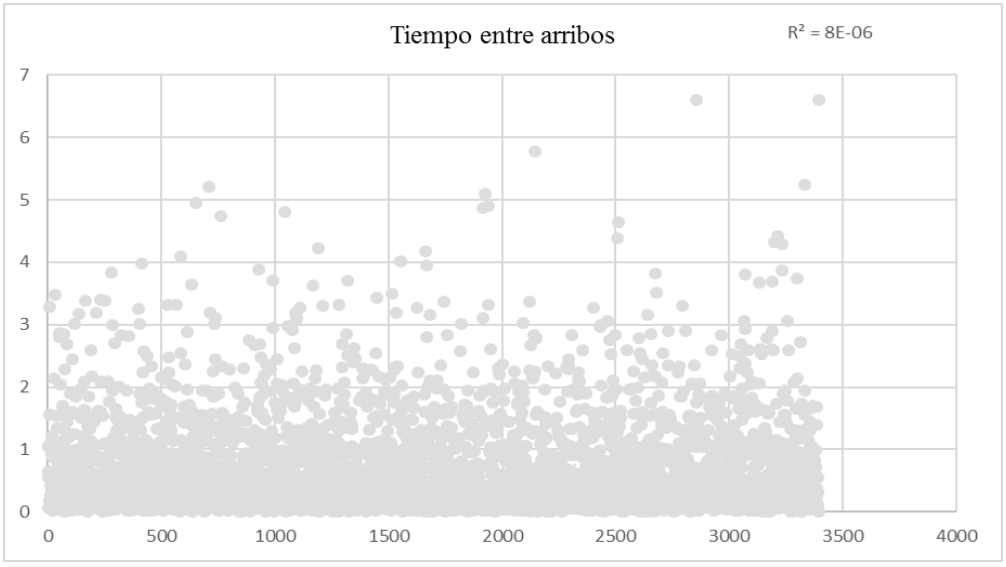
Ho: el conjunto de datos correspondientes a tiempo entre arribos es independiente.

Tabla 9 prueba de rachas conjunto de datos tiempo entre arribos

Prueba de rachas					
	Toma 1	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
Valor de prueba	,52	,55	,55	,51	,78
Casos < Valor de prueba	431	414	421	415	12
Casos >= Valor de prueba	432	415	421	415	12
Casos totales	863	829	842	830	24
Número de rachas	415	419	391	411	15
Z	-1,192	,243	-2,138	-,347	,626
Sig. asintótica (bilateral)	,233	,808	,033	,728	,531
a. Mediana					

Los valores de significancia asintótica bilateral para las diferentes tomas de datos analizada son significativamente altos, a excepción del conjunto de datos de la toma No. 3,

por lo que se realiza el grafico de dispersión de puntos y se calcula el índice de correlación, como se muestra en la gráfica No. 18



Grafica No 18 prueba de independencia tiempo entre arribos

Dado que el índice de correlación resulta menor a 0,3, no se rechaza la hipótesis nula de independencia del conjunto de datos.

4.3.1.2.Acceso Norte

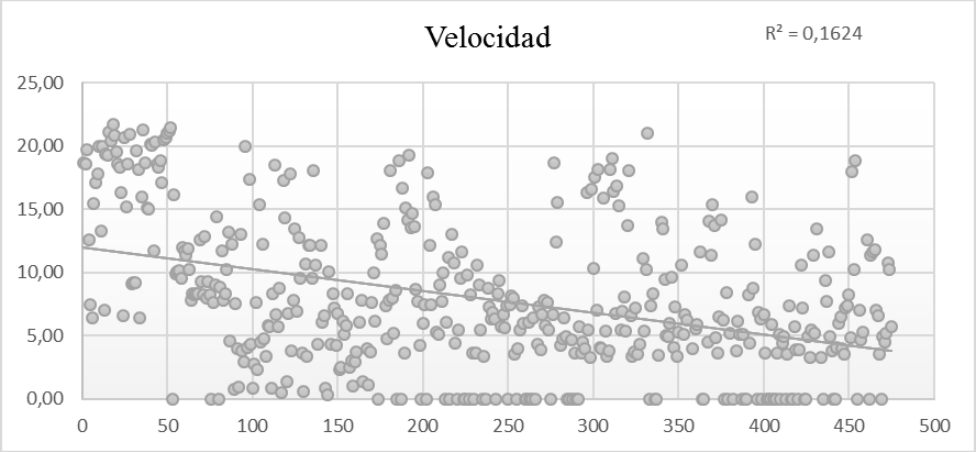
Se muestra en la tabla No. 10 la prueba de rachas realizada al conjunto de datos obtenidos del acceso norte- sur, en el que se observa el valor de significación asintótica bilateral, partiendo de:

Ho: el conjunto de datos del acceso norte es independiente.

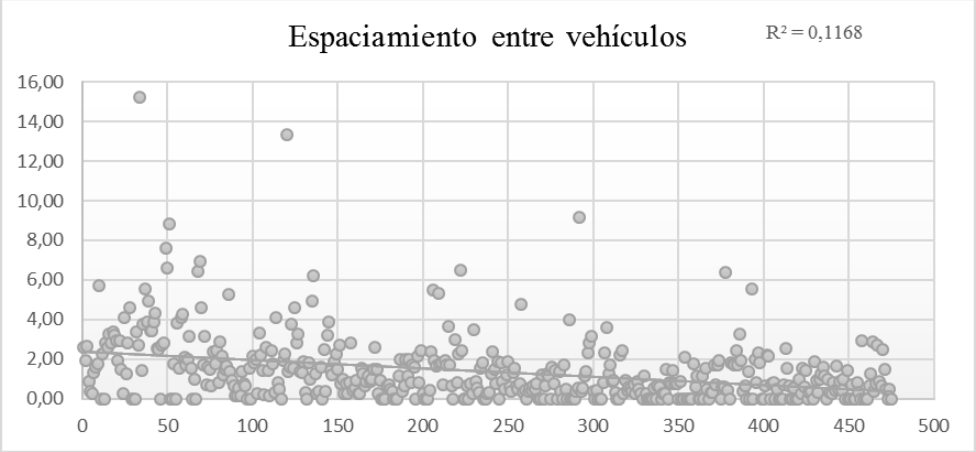
Tabla 10 prueba de rachas conjunto de datos acceso norte

Prueba de rachas						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Valor de prueba	7,7904164	1,4616031	1,4432812	6,3874350	1,1174689	1,3203452
Casos < Valor de prueba	147	135	43	58	50	21
Casos >= Valor de prueba	147	135	43	58	51	21
Casos totales	294	270	86	116	101	42
Número de rachas	102	110	39	58	48	25
Z	-5,375	-3,171	-1,085	-,187	-,699	,781
Sig. asintótica (bilateral)	,000	,002	,278	,852	,484	,435
a. Mediana						

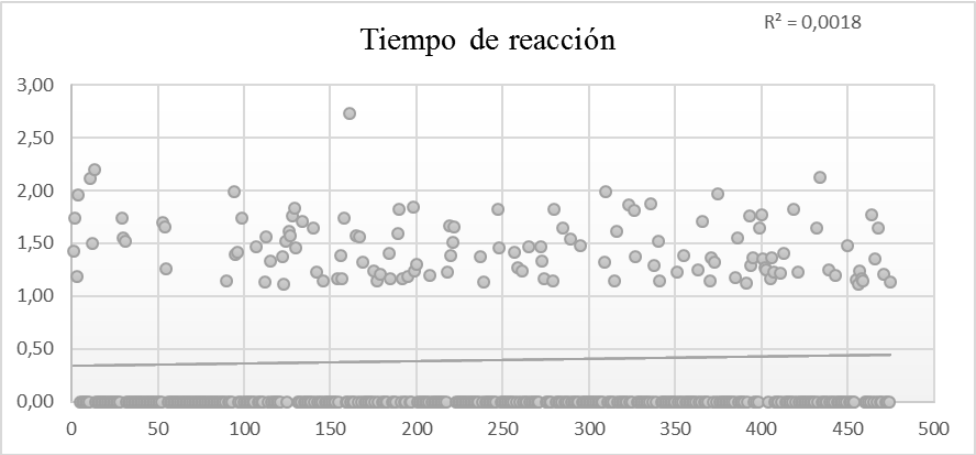
Para las variables de velocidad y espaciamiento de vehículos pasivos, se rechaza la hipótesis nula dado el bajo valor de significación asintótica. Por lo que se procede a verificar mediante las pruebas de independencia y nube de puntos que se muestran en las gráficas No.19,20 y 21. Resultando un valor mayor a 0,3 de índice de correlación, sin embargo, bajo el concepto de quienes desarrollan el presente proyecto se considera la variable de velocidad como de espaciamiento entre vehículos independiente, dado que la diferencia con el valor de comparación no es significativa.



Gráfica No 19 prueba de independencia datos de velocidad acceso norte



Grafica No 20 prueba de independencia datos de espaciamiento acceso norte



Grafica No 21 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso norte

4.3.1.3.Acceso Occidente

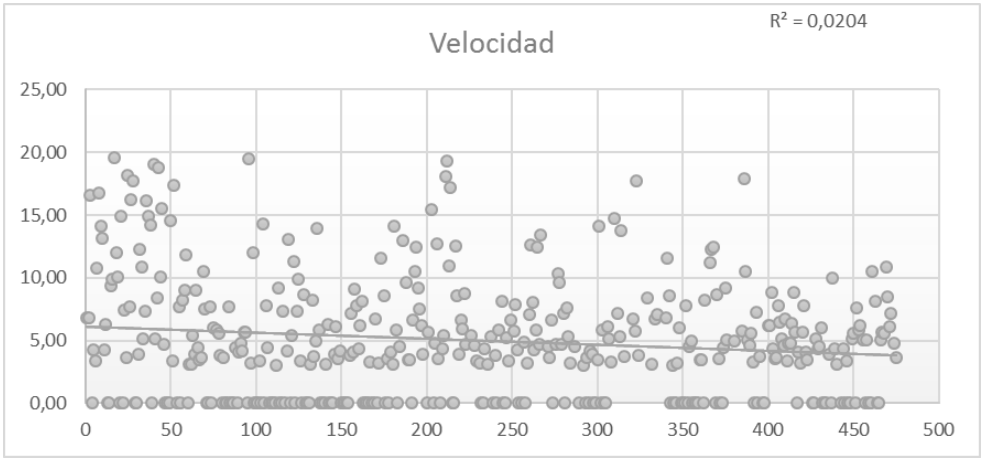
El resultado de la prueba de rachas para el conjunto de datos del acceso occidente se presenta en la tabla No.11.

Ho: el conjunto de datos del acceso occidente es independiente.

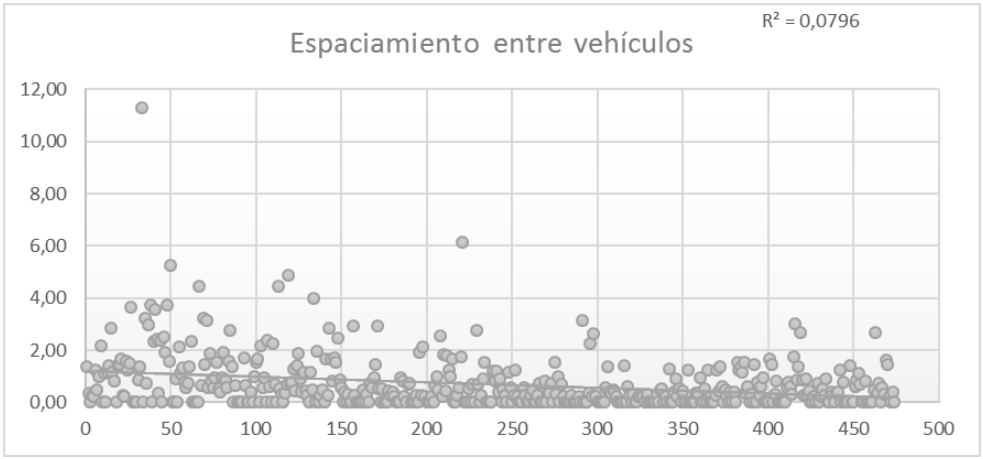
Tabla 11 prueba de rachas conjunto de datos acceso occidente

Prueba de rachas						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Valor de prueba[a]	6,62620223	,972232977	1,55965199	6,06942746	,746551627	2,24880804
Casos < Valor de prueba	56	64	36	33	34	31
Casos >= Valor de prueba	57	65	37	34	34	31
Casos totales	113	129	73	67	68	62
Número de rachas	48	73	37	37	25	30
Z	-1,795	1,327	-,116	,618	-2,444	-,512
Sig. asintótica (bilateral)	,073	,185	,907	,537	,015	,608
a. Mediana						

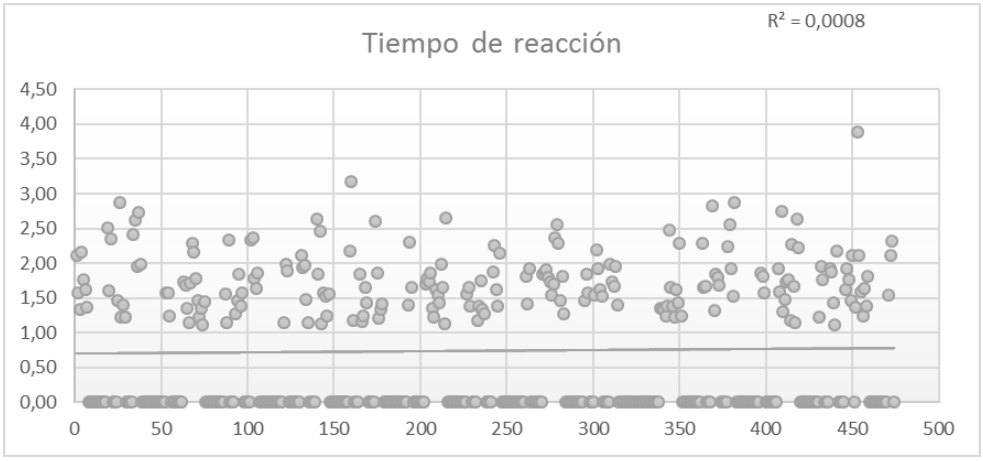
A excepción de la variable espaciamiento entre vehículos de agentes agresivos, no se rechaza la hipótesis nula de independencia.se procede a realizar la prueba de nube de puntos e índice de correlación.



Grafica No 22 prueba de independencia datos de velocidad acceso occidente



Grafica No 23 prueba de independencia datos de espaciamiento acceso occidente



Grafica No 24 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso occidente

Tras las pruebas, se comprueba el alto nivel de independencia del conjunto de datos del acceso occidente, lo anterior se representa gráficamente en las ilustraciones No.22,23 y 24.

4.3.1.4.Acceso Sur

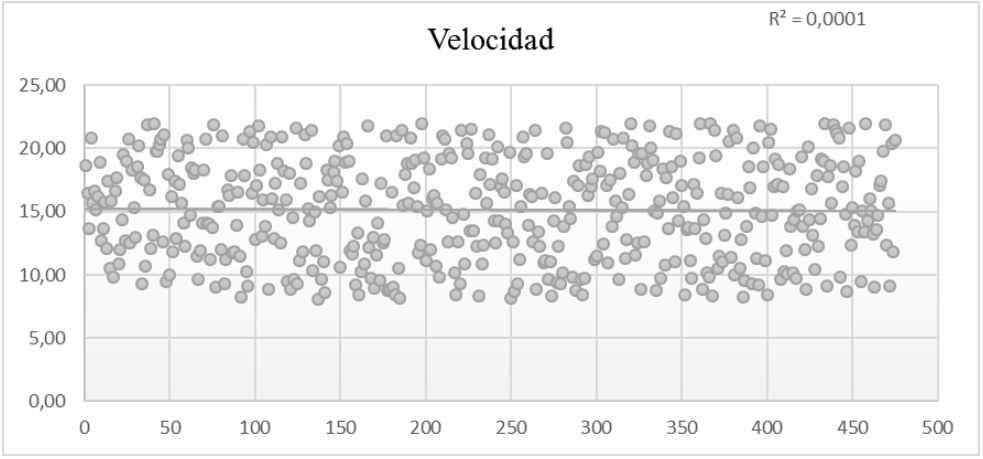
Se plantea la hipótesis nula de independencia para los datos del acceso y se procede a efectuar las pruebas correspondientes. Los resultados de la prueba de racha para los datos de dicho acceso se muestran en la tabla No.12.

Ho: el conjunto de datos del acceso sur es independiente.

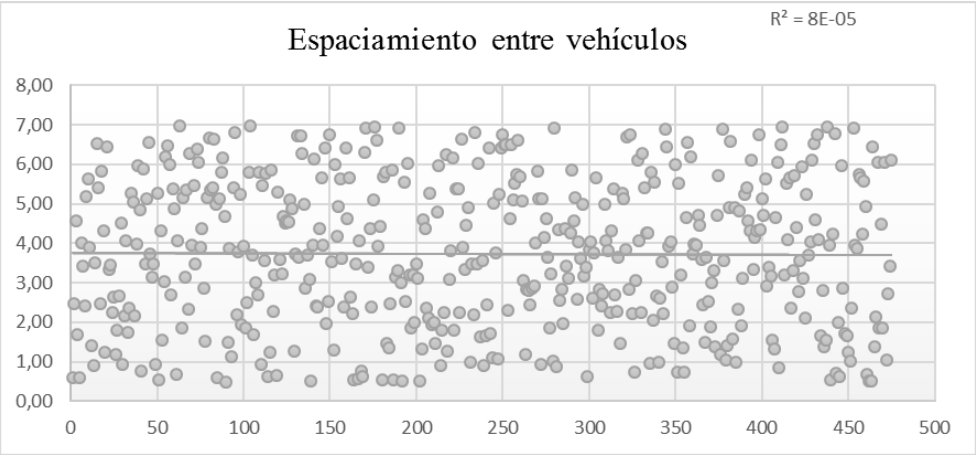
Tabla 12 prueba de rachas conjunto de datos acceso sur

Prueba de rachas						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Valor de prueba[a]	,00000000	,00000000	,00000000	15,430000	3,9600000	5,5800000
Casos < Valor de prueba	0	0	0	214	213	214
Casos >= Valor de prueba	300	300	300	215	216	215
Casos totales	300	300	300	429	429	429
Número de rachas	1[c]	1[c]	1[c]	225	213	170
Z				,919	-,241	-4,399
Sig. asintótica (bilateral)				,358	,810	,000
a. Mediana						
b. Todos los valores son mayores o menores que el corte. No se puede realizar la prueba de rachas.						
c. Sólo se produce una racha. No se puede realizar la prueba de rachas.						

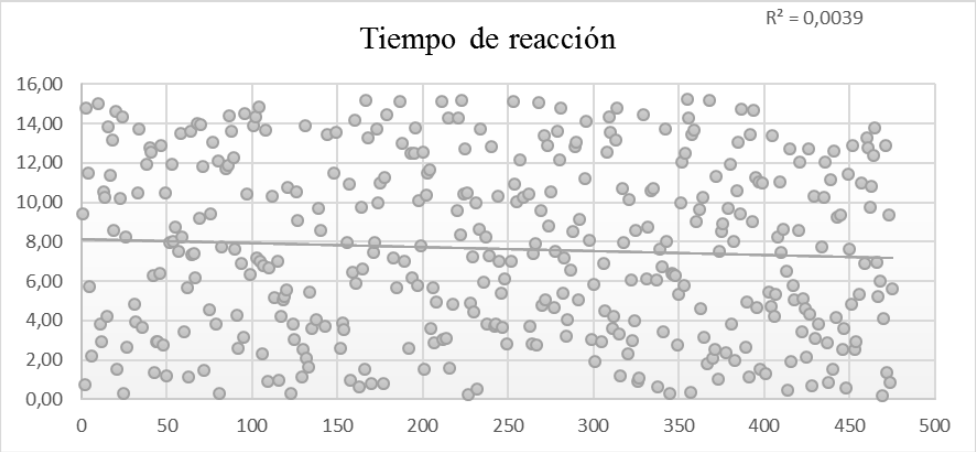
Para el caso del conjunto de datos del acceso Sur, la prueba de rachas no se puede realizar estableciendo como punto de corte la mediana, por lo que como decisor se tendrá el resultado de la prueba de nube de puntos y el índice de correlación de los datos.



Grafica No 25 prueba de independencia datos de velocidad acceso sur



Grafica No 26 prueba de independencia datos de espaciamiento entre vehículos acceso sur



Grafica No 27 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso sur

Al analizar el conjunto de datos del acceso, sin previa clasificación el valor del índice de correlación de los datos soporta la independencia de la muestra, como se observa en las gráficas No 25,26 y 27.

4.3.1.5.Acceso Oriente

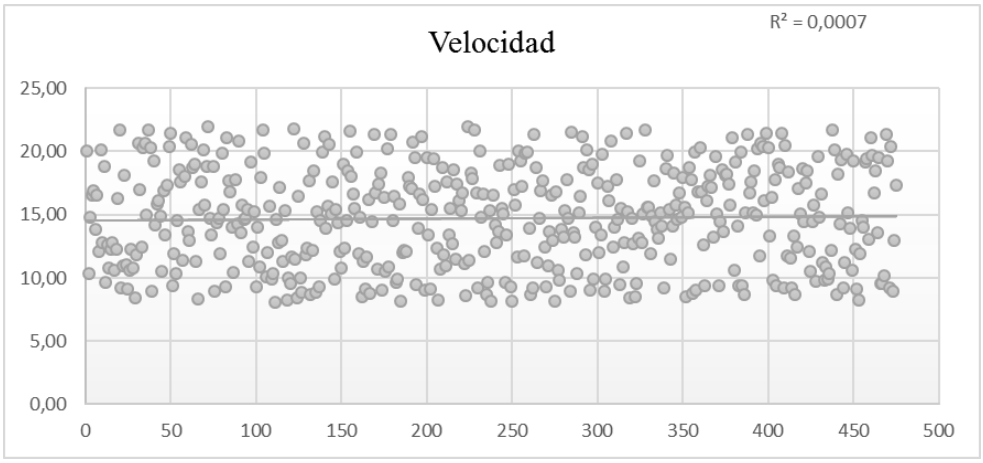
Análogamente a los procedimientos anteriores, se realiza la prueba de rachas y cuyo resultado se resume en la tabla No 13:

Ho: el conjunto de datos del acceso oriente es independiente.

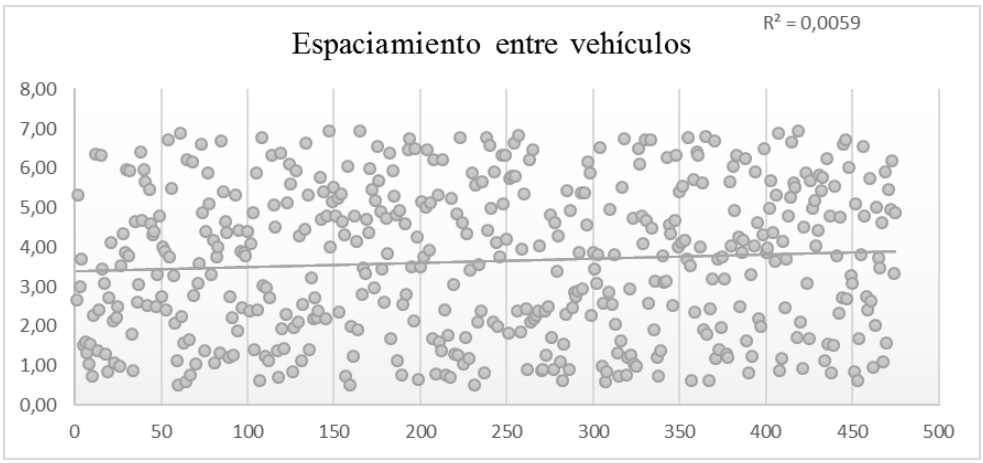
Tabla 13 prueba de rachas conjunto de datos acceso Oriente

Prueba de rachas						
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
Valor de prueba[a]	11,900000	2,1100000	5,260000001	14,65500001	4,000000000	7,620000000
Casos < Valor de prueba	21	21	21	216	215	167
Casos >= Valor de prueba	22	22	22	216	217	168
Casos totales	43	43	43	432	432	335
Número de rachas	20	25	30	232	226	160
Z	-,614	,621	2,166	1,445	,867	-,930
Sig. asintótica (bilateral)	,539	,534	,030	,148	,386	,352
a. Mediana						

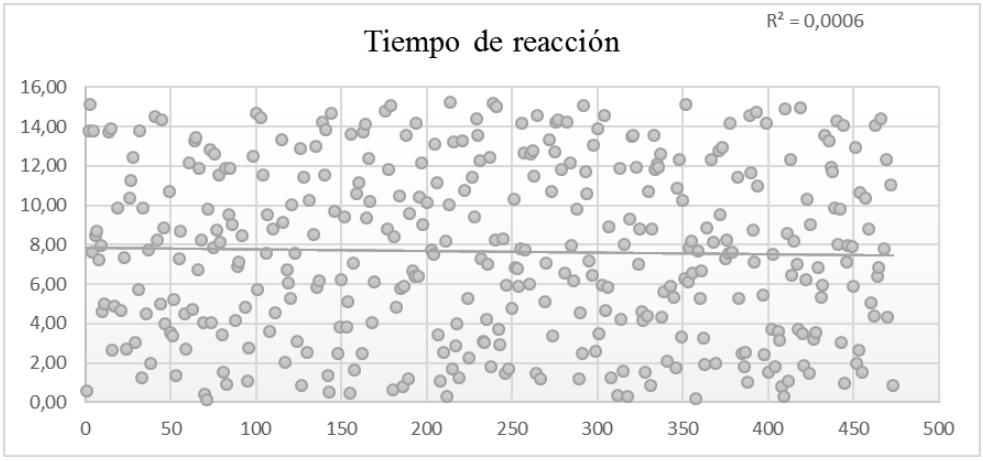
La significación asintótica es suficientemente alta para no rechazar la hipótesis nula de independencia para las variables a excepción del tiempo de reacción para el agente pasivo, donde el valor es menor a 0.05, por lo que a continuación se presenta la prueba de nube de puntos y el índice de correlación del conjunto de datos del acceso.



Grafica No 28 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso oriente



Grafica No 29 prueba de independencia datos de espaciamiento entre vehículos acceso oriente



Grafica No 30 prueba de independencia datos de tiempo de reacción acceso oriente

Con base al índice de correlación se acepta la hipótesis nula de independencia de los datos del acceso oriente inherente a la prueba, como se aprecia en las gráficas No. 28,29 y 30. Tras la verificación de la independencia de la muestra se procede a realizar las pruebas de homogeneidad.

4.3.2. Pruebas de homogeneidad

La evaluación de homogeneidad se realizó formando clústeres con los datos recopilados de la muestra a los 19000 vehículos, estos mismos se analizaron sin ninguna distinción de día ni hora de día; inicialmente se evaluó la hipótesis de homogeneidad de las diferentes variables en diferente acceso, sin embargo, tras las pruebas se rechazó la hipótesis nula y se procedió a agrupar según raza en mismo acceso, los resultados se presentan a continuación.

Las pruebas de Kruskal Wallis o prueba de k muestras independientes y la prueba de diferencia de medianas se efectuaron en el software SPSS statistics 24.

4.3.2.1.Tiempo entre arribos

Se efectúa, para el conjunto de datos correspondientes a tiempo entre arribos las pruebas de Kruskal Wallis y prueba de diferencia de medianas, partiendo de la hipótesis nula de homogeneidad de la muestra y obteniendo:

Ho: los datos de tiempo entre arribos son homogéneos en las muestras recopiladas

Tabla 14 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo entre arribos

Estadísticos de prueba[a,b]				
	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
Chi-cuadrado	3,844	3,923	3,465	4,163
gl	5	5	5	2
Sig. asintótica	,572	,561	,629	,125
a. Prueba de Kruskal Wallis				
b. Variable de agrupación: Toma 1				

Tabla 15 Resultados prueba de medianas: datos tiempo entre arribos

Estadísticos de prueba[a,b]				
	Toma 2	Toma 3	Toma 4	Toma 5
Chi-cuadrado	3,844	3,923	3,465	4,163
gl	5	5	5	2
Sig. asintótica	,572	,561	,629	,125
a. Prueba de Kruskal Wallis				
b. Variable de agrupación: Toma 1				

El valor de la significación asintótica es lo suficientemente alto para no rechazar la hipótesis nula de homogeneidad de la muestra, como se observa en las tablas No. 14 y 15.

4.3.2.2.Acceso Norte

Velocidad

Ho: los datos de la velocidad son homogéneos en las muestras del acceso norte

Tabla 16 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos velocidad acceso norte

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V4
Chi-cuadrado	12,011
gl	11
Sig. asintótica	,363
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V1	

Tabla 17 Resultados prueba de medianas: datos velocidad acceso norte

Estadísticos de prueba[a]	
	V4
N	65
Mediana	6,879511831
Chi-cuadrado	13,385[b]
gl	11
Sig. asintótica	,269
a. Variable de agrupación: V1	
b. 22 casillas (84,6%) han esperado frecuencias menores que 5. La frecuencia mínima de casilla esperada es 1,0.	

El valor de la significación asintótica es lo suficientemente alto para no rechazar la hipótesis nula de homogeneidad de la muestra, como se observa en las tablas No.16 y 17.

- Espaciamiento entre vehículos

Ho: los datos del espaciamiento entre vehículos son homogéneos en las muestras del acceso norte

Tabla 18 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos espaciamiento entre vehículos acceso norte

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V5
Chi-cuadrado	7,078
gl	7
Sig. asintótica	,421
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V2	

Tabla 19 Resultados prueba mediana: datos espaciamiento de vehículos acceso norte

Estadísticos de prueba[a]	
	V5
N	99
Mediana	1,1187211120
Chi-cuadrado	8,679[b]
gl	7
Sig. asintótica	,277
a. Variable de agrupación: V2	
b. 8 casillas (50,0%) han esperado frecuencias menores que 5. La frecuencia mínima de casilla esperada es ,5.	

En la tabla No.18 y No.19, se aprecia un valor considerable de la significación asintótica por lo que se acepta la homogeneidad del conjunto de datos de espaciamiento entre vehículos.

- Tiempo de reacción

Ho: los datos del tiempo de reacción son homogéneos en las muestras del acceso norte

Por medio de las pruebas de Kruskal-Wallis y diferencia de medianas aplicadas al conjunto de datos y cuyos resultados se muestran en las tablas No.20 y 21, respectivamente, se concluye no rechazar la hipótesis nula planteada

Tabla 20 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo de reacción acceso norte

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V6
Chi-cuadrado	1,002
gl	1
Sig. asintótica	,317
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V3	

Tabla 21 Resultados prueba medianas: datos tiempo de reacción acceso norte

Estadísticos de prueba[a]	
	V6
N	42
Mediana	1,320345210000000
Chi-cuadrado	3,231[b]
gl	1
Sig. asintótica	,072
a. Variable de agrupación: V3	

4.3.2.3.Acceso Occidente

- Velocidad

Ho: los datos de velocidad son homogéneos en las muestras del acceso occidente

Tabla 22 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos velocidad acceso occidente

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V4
Chi-cuadrado	22,285
gl	16
Sig. asintótica	,134
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V1	

Tabla 23 Resultados prueba medianas: datos velocidad acceso occidente

Estadísticos de prueba[a]	
	V4
N	67
Mediana	6,0694274630
Chi-cuadrado	14,800[b]
gl	16
Sig. asintótica	,539
a. Variable de agrupación: V1	

El resultado anterior, presentado en las tablas No.22 y 23 permite aceptar la homogeneidad del conjunto de datos correspondientes a velocidad del acceso occidente.

- Espaciamiento entre vehículos

Ho: los datos de espaciamiento entre vehículos son homogéneos en las muestras del acceso occidente

Tabla 24 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos espaciamiento entre vehículos acceso occidente

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V5
Chi-cuadrado	4,070
gl	5
Sig. asintótica	,539
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V2	

Tabla 25 Resultados prueba medianas: datos espaciamiento entre vehículos acceso occidente

Estadísticos de prueba[a]	
	V5
N	68
Mediana	,746551627000000
Chi-cuadrado	3,766[b]
gl	5
Sig. asintótica	,584
a. Variable de agrupación: V2	

El valor de significación asintótica resultante de las pruebas de Kruskal Wallis y diferencia de medianas, señalados en las tablas No.24 y 25, permite asumir homogeneidad en los datos correspondientes al espaciamiento entre vehículos.

- Tiempo de reacción

Ho: los datos de tiempo de reacción son homogéneos en las muestras del acceso occidente

Tabla 26 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo de reacción entre vehículos acceso occidente

Estadísticos de prueba		
	V3	V6
Chi-cuadrado	,000[a]	,000[b]
gl	72	61
Sig. asintótica	1,000	1,000

Para el caso de la variable tiempo de reacción en el acceso occidente solo se realiza la prueba de Kruskall Wallis, cuyo resultado se presenta en la tabla No.26, ya que gran cantidad de datos se encuentra por debajo del valor de la mediana por lo que no se puede efectuar la prueba de diferencia de medianas.

4.3.2.4.Acceso Sur

- Velocidad

Ho: los datos de velocidad son homogéneos en las muestras del acceso sur

Tabla 27 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos velocidad acceso sur

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V4
Chi-cuadrado	,741
gl	7
Sig. asintótica	,998
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V1	

Tabla 28 Resultados prueba medianas: datos velocidad acceso sur

Estadísticos de prueba[a]	
	V4
N	45
Mediana	15,700000001
Chi-cuadrado	1,078[b]
gl	7
Sig. asintótica	,993
a. Variable de agrupación: V1	
b. 16 casillas (53,3%) han esperado frecuencias menores que 5. La frecuencia mínima de casilla esperada es 1,0.	

El valor de la significación asintótica es considerablemente alto para no rechazar la hipótesis nula de homogeneidad de la muestra, como se observa en las tablas No.27 y 28.

- Espaciamiento entre vehículos

Ho: los datos de espaciamiento entre vehículos son homogéneos en las muestras del acceso sur

Tabla 29 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos espaciamiento entre vehículos acceso sur

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V5
Chi-cuadrado	,005
gl	2
Sig. asintótica	,997
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V2	

Tabla 30 Resultados prueba medianas: datos espaciamiento entre vehículos acceso sur

Estadísticos de prueba[a]	
	V5
N	40
Mediana	3,500000000
Chi-cuadrado	,154[b]
gl	2
Sig. asintótica	,926
a. Variable de agrupación: V2	

Dado el valor resultante de las pruebas efectuadas, como se presentan en las tablas No. 29 y 30, se acepta la hipótesis de homogeneidad de los datos de espaciamiento entre vehículos.

- Tiempo de reacción

Ho: los datos de tiempo de reacción son homogéneos en las muestras del acceso sur

Tabla 31 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo de reacción acceso sur

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V6
Chi-cuadrado	,926
gl	6
Sig. asintótica	,988
a. Prueba de Kruskal Wallis	

Tabla 32 Resultados prueba medianas: datos tiempo de reacción entre vehículos acceso sur

Estadísticos de prueba[a]	
	V6
N	43
Mediana	7,500000001
Chi-cuadrado	2,256[b]
gl	6
Sig. asintótica	,895
a. Variable de agrupación: V3	

El resultado anterior, presentado en las tablas No.31 y 32 permite aceptar la homogeneidad del conjunto de datos correspondientes a velocidad del acceso occidente.

4.3.2.5.Acceso Oriente

- Velocidad

Ho: los datos de velocidad son homogéneos en las muestras del acceso oriente

El valor de significación asintótica resultante de las pruebas de Kruskal Wallis y diferencia de medianas, señalados en las tablas No.33 y 34, permite asumir homogeneidad en los datos correspondientes al espaciamiento entre vehículos.

Tabla 33 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos velocidad acceso oriente

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V4
Chi-cuadrado	3,694
gl	6
Sig. asintótica	,718
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V1	

Tabla 34 Resultados prueba medianas: datos velocidad acceso oriente

Estadísticos de prueba[a]	
	V4
N	43
Mediana	12,7600000
Chi-cuadrado	7,692[b]
gl	6
Sig. asintótica	,262
a. Variable de agrupación: V1	

- Espaciamiento entre vehículos

Ho: los datos de espaciamiento entre vehículos son homogéneos en las muestras del acceso oriente

Tabla 35 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos espaciamiento entre vehículos acceso oriente

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V5
Chi-cuadrado	,620
gl	2
Sig. asintótica	,733
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V2	

Tabla 36 Resultados prueba medianas: datos espaciamiento entre vehículos acceso oriente

Estadísticos de prueba[a]	
	V5
N	35
Mediana	3,5000000000
Chi-cuadrado	,258[b]
gl	2
Sig. asintótica	,879
a. Variable de agrupación: V2	

El resultado anterior, presentado en las tablas No.35 y 36 permite aceptar la homogeneidad del conjunto de datos correspondientes a velocidad del acceso occidente.

- Tiempo de reacción

Ho: los datos de tiempo de reacción son homogéneos en las muestras del acceso oriente

Tabla 37 Resultados prueba Kruskal Wallis: datos tiempo de reacción acceso oriente

Estadísticos de prueba[a,b]	
	V6
Chi-cuadrado	10,976
gl	7
Sig. asintótica	,140
a. Prueba de Kruskal Wallis	
b. Variable de agrupación: V3	

Tabla 38 Resultados prueba medianas: datos tiempo de reacción acceso oriente

Estadísticos de prueba[a]	
	V6
N	43
Mediana	8,2300000000000
Chi-cuadrado	11,593[b]
gl	7
Sig. asintótica	,115
a. Variable de agrupación: V3	

Para el caso de la variable tiempo de reacción en el acceso occidente solo se realiza la prueba de Kruskall Wallis, ya que gran cantidad de datos se encuentra por debajo del valor de la mediana por lo que no se puede efectuar la prueba de diferencia de medianas.

4.3.3. Pruebas de bondad y ajuste

A fin de aproximar la naturaleza de los datos obtenidos al evaluar las variables identificadas a una distribución teórica, se realiza en el software Experfit de Flexsim, las pruebas de bondad y ajuste. El procedimiento consiste en plantear una serie de hipótesis acerca de la distribución conceptual que logre un ajuste más cercano al fenómeno de estudio, para luego aceptar o rechazar este supuesto mediante el criterio definido en cada prueba aplicada.

El ajuste se realizó para cada variable evaluada tras la clasificación de los datos en las razas conductor agresivo o pasivo de cada acceso de la intersección de estudio (Ver Anexo B), resultando en la distinción de poblaciones que se presenta a continuación en la tabla No.39.

Tabla 39 Definición de poblaciones

POBLACIÓN	DESCRIPCIÓN	VARIABLE	DISTRIBUCIÓN		
Población No. 1	Agente pasivo acceso Norte-sur	Velocidad	Johnson Sb	a	6.711^{-4}
				b	41.86
				ϒ	1.68
				δ	1.21
		Espaciamiento entre vehículos	Pearson Type VI(E)	Ubicación	0.1157
				escala	9.86
				ϒ	1.30
				δ	8.27
		Tiempo de reacción	Beta	a	1.11
				b	2.97
				ϒ	1.08
				δ	4.16
Población No. 2	Agente agresivo acceso Norte-sur	Velocidad	Gamma	Ubicación	0
				escala	3.82
				ϒ	2.74
		Espaciamiento entre vehículos	Pearson Type VI(E)	Ubicación	0.13
				escala	4.01
				ϒ	1.6
				δ	6.05
		Tiempo de reacción	Johnson Sb	a	1.10
				b	1.98
				ϒ	0.58
				δ	0.53
		Porcentaje de infractores			
		Cambios de carril	Sobrepaso de vehículos	Respeto por el cambio de semáforo	Respeto por la cebra

		9,47%	2,95%	26,95%	27,16%
Población No. 3	Agente pasivo acceso Occidente-oriente	Velocidad	Johnson Sb	a	3.03
				b	20.96
				ϒ	0.80
				δ	0.57
		Espaciamiento entre vehículos	Gamma (E)	Ubicación	0.21
				escala	1.06
				ϒ	1.06
		Tiempo de reacción	Beta	a	1.10
				b	2.00
				ϒ	0.97
				δ	1.06
Población No. 4	Agente agresivo acceso Occidente-oriente	Velocidad	Beta	a	3.09
				b	22.01
				ϒ	0.69
				δ	2.48
		Espaciamiento entre vehículos	Pearson Type VI(E)	Ubicación	0.21
				escala	5.85
				ϒ	0.71
				δ	4.98
		Tiempo de reacción	Weibull (E)	Ubicación	1.25^{-4}
				Escala	2.35
				ϒ	4.3
		Porcentaje de infractores			
		Cambios de carril	Sobrepaso de vehículos	Respeto por el cambio de semáforo	Respeto por la cebra
		12,63%	1,05%	6,53%	8,63%
Población No. 5	Agente pasivo acceso Sur-norte	Velocidad	Distribución empírica		
		Espaciamiento entre vehículos	Beta	Ubicación	0.99
				escala	98.12
				ϒ	0.24
				δ	0.63
		Tiempo de reacción	Johnson Sb	a	0.96
				b	99.28
				ϒ	0.72
				δ	0.38
Población No. 6	Agente agresivo acceso Sur-norte	Velocidad	Función empírica		
		Espaciamiento entre vehículos			
		Tiempo de reacción			
		Porcentaje de infractores			
		Cambios de carril	Sobrepaso de vehículos	Respeto por el cambio de semáforo	Respeto por la cebra

		3,16%	1,89%	4,42%	6,53%
Población No. 7	Agente pasivo acceso Oriente-occidente	Velocidad	Johnson Sb	a	7.97
				b	98.55
				ϒ	0.63
				δ	0.36
		Espaciamiento entre vehículos	Johnson Sb	a	0.94
				b	99.09
				ϒ	0.71
				δ	0.36
		Tiempo de reacción	Johnson SB	a	0.94
				b	101.4
				ϒ	0.88
				δ	0.44
Población No. 8	Agente agresivo acceso Oriente-occidente	Velocidad	Función empírica		
		Espaciamiento entre vehículos			
		Tiempo de reacción			
		Porcentaje de infractores			
		Cambios de carril	Sobrepaso de vehículos	Respeto por el cambio de semáforo	Respeto por la cebra
		0,21%	3,37%	5,47%	8,42%

Se considera para todas las poblaciones definidas el mismo tiempo entre arribos, regido por una distribución exponencial con parámetros señalados en la tabla No 40

Tabla 40 Distribución tiempo entre arribos

Tiempo entre arribos	Distribución		
	Exponencial	λ	0,76

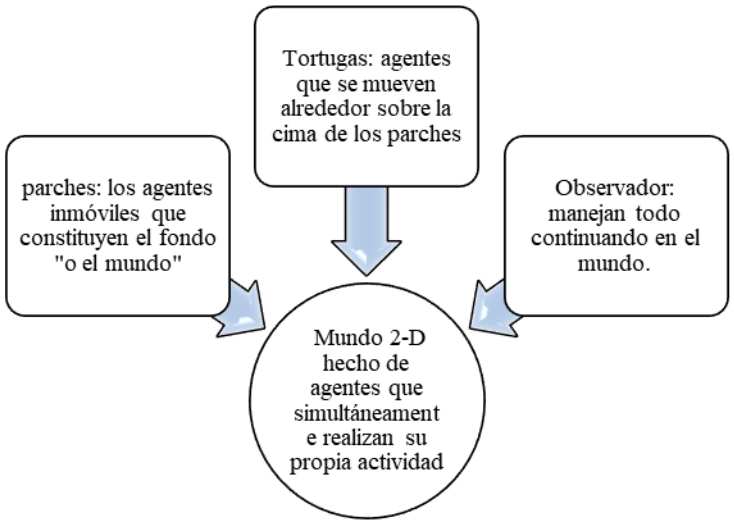
En el caso de la población de agente agresivo en el acceso sur y oriente, la función de densidad de probabilidad fue empírica ya que no se logró un ajuste adecuado con las distribuciones teóricas. Para efectos de la simulación, respecto a las variables como sobrepaso de vehículos, irrespeto al semáforo, irrespeto a la cebra e infracciones según el modelo se parte del promedio de las observaciones realizadas y de históricos obtenidos en bases de datos distritales y nacionales.

5. Construcción modelo de simulación

Se presenta a continuación el procedimiento efectuado para realizar la traslación del modelo matemático realizado a lenguaje computacional con propósito específico. Para el caso, se utilizó como herramienta computacional NetLogo, entorno de modelado programable multi-agente. La elección del software se sustentó a partir de la facilidad de obtención, dado que es un software libre.

5.1.Modelo computacional

Inicialmente, se desarrolló el entorno de la simulación, con el objetivo de representar las características físicas de la intersección en estudio, para luego proceder a ingresar los datos obtenidos y presentados en el capítulo de análisis de entrada. Se presenta en la gráfica No.31 los componentes de NetLogo. Cabe resaltar las modificaciones se efectuaron en lenguaje de programación Logo.

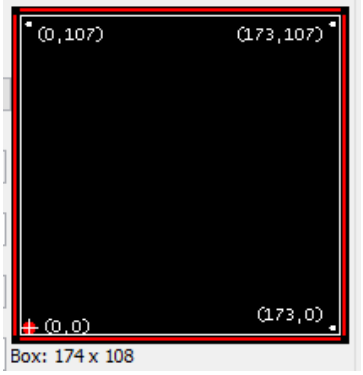


Grafica No 31 componentes NetLogo. Fuente. Propia.

Para la realización del entorno de la simulación, se consideraron las longitudes de vía de cada tramo a simular, para dicha consideración se obtuvieron los datos con la herramienta medir distancia de la aplicación Google Maps. Partiendo de las longitudes de vía, se establece la escala de dos metros por cada pixel en el software, resultando un entorno sin límites. Lo anterior se muestra en la tabla No.41

Tabla 41 Tamaño entorno de simulación

Acceso	Longitud aproximada (mts)	
Norte-Sur	207,39	81,08
Occidente-Oriente	131,20	120,48
Sur-Norte	120,48	96,09
Oriente-Occidente	163	111,12



Coordenada	Valor
Min pxcor	0
Max pxcor	173
Min pycor	0
Max pycor	107

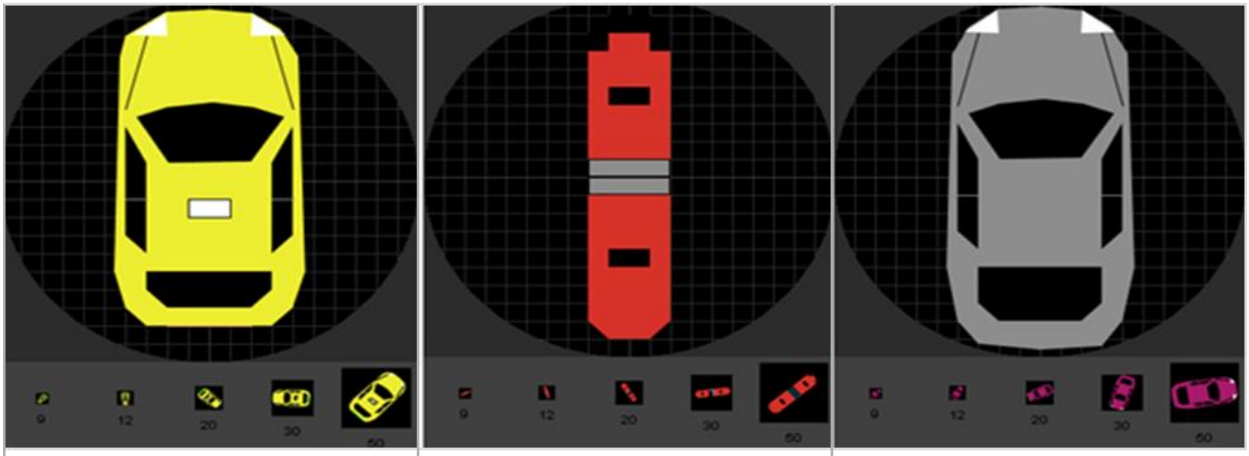
Con el propósito de lograr una aproximación a las condiciones de infraestructura de la intersección de estudio, se generaron los cuatro accesos con sus respectivas características, dichas características se resumen en el capítulo uno, apartado área de estudio.

```
to setup
clear-all
ask patches [set pcolor white]
ask patches [ if(pxcor < 74 and pycor > 59)[set pcolor black]
if(pxcor > 99 and pycor > 72)[set pcolor black]
if(pxcor > 114 and pycor > 58)[set pcolor black]
if(pxcor < 74 and pycor < 49)[set pcolor black]
if(pxcor > 99 and pycor < 49)[set pcolor black]
if(pxcor = 75)[set pcolor white]if(pxcor = 98)[set pcolor white]if(pycor =
50)[set pcolor white]if(pycor = 58)[set pcolor white]
if(pxcor >= 76 and pxcor <= 97)[set pcolor gray]
if(pxcor = 81)[set pcolor white]if(pxcor = 87)[set pcolor white]if(pxcor =
93)[set pcolor white]
if(pycor >= 51 and pycor <= 57)[set pcolor gray]
if(pycor = 54 and pxcor <= 75)[set pcolor white]if(pycor = 54 and pxcor >=
98)[set pcolor white]
if(pxcor = 78 and pycor <= 50)[set pcolor white]

]Psemaforos
reset-ticks
end
```

De la misma manera, el reloj de la simulación, identificado como “ticks” en NetLogo corresponde a 10 segundos de tiempo por cada activación del contador establecido. Respecto

a las tortugas empleadas en la simulación se diseñaron un total de 3 modelos pertenecientes a Transmilenio, taxis y vehículos, resultando el producto grafico visible en la gráfica No.32.



Taxi	Transmilenio	Auto
Px: 1.5	Px: 2	px: 1.5

Grafica No 32 tortugas modelo computacional

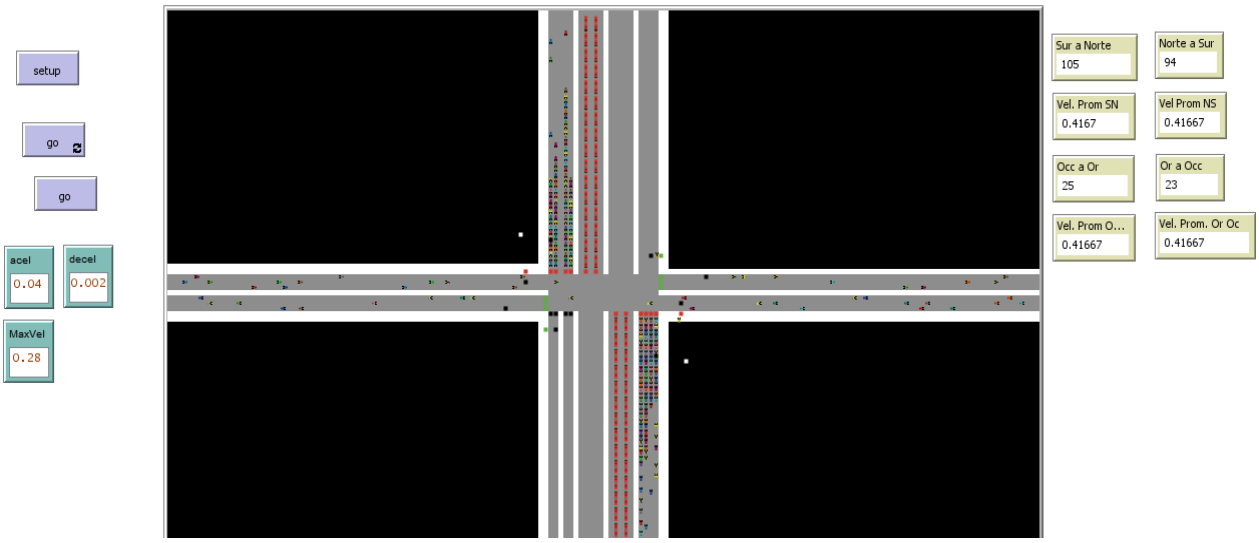
Para la definición de agentes, se identificaron y establecieron un total de diecisiete (17) razas entre ellas las tortugas ya mencionadas, los autos por acceso con sus respectivos atributos, semáforos y los desvíos, además, se programaron dieciocho (18) procedimientos teniendo en cuenta “setup” el cual reinicia el conteo de ticks, velocidad, sobrepasos, entre otros cuyo código se presenta en el anexo C del presente documento.

```
breed[transmilenios transmilenio]
breed[autos auto]
breed[autos2 auto2]
breed[autos3 auto3]
autos-own[girar vel paciencia carril]
autos2-own[girar vel paciencia carril]
autos3-own[girar vel paciencia carril]
breed[lightsR lightR]
breed[lightsL lightL]
breed[lightsU lightU]
breed[lightsD lightD]
breed[desvios1 desvio1]
breed[desvios2 desvio2]
breed[desvios3 desvio3]
breed[desvios4 desvio4]
```

```
breed[desvios5 desvio5]
globals[redV greenV redH greenH]
```

El fragmento de código presentado, corresponde a la definición de razas (breed) en el modelo, por lo que se observan los automóviles con los atributos de sobrepaso, paciencia, velocidad y cambio de carril, de igual manera, se definen los semáforos y las salidas de cada acceso

Integrando las tortugas al entorno, la interfaz del modelo computacional resulta como se observa en la gráfica No. 33, considerando que, dada la cantidad de poblaciones y la respectiva funcion de densidad de probabilidad de las variables definidas como aleatorias consumía gran parte del recurso computacional disponible, se simplificó el entorno de la simulación.



Grafica No 33 Interfaz simulación NetLogo. Fuente. Propia.

5.2.Planteamiento de escenarios

Tras la identificación de las variables aleatorias en el sistema, se prosiguió con el planteamiento de cuatro escenarios, evaluando las medidas de desempeño identificadas en la etapa de definición del problema: longitud de cola y velocidad promedio en la intersección de estudio. Para los diferentes escenarios aquí señalados los parámetros de la simulación fueron: tiempo de semáforos los cuales se resumen en la tabla No.42 y corresponden a mediciones hechas en campo.

Tabla 42 Tiempos semáforos

Acceso	Ciclo en rojo	Ciclo en verde
Norte-sur	56.49	1:02.96
Occidente-oriente	1:35.94	24.51
Sur-Norte	56.49	1:02.96
Oriente-occidente	1:35.94	24.51
Salidas	1:26.02	31.45

La probabilidad de ruta, siendo este parámetro la probabilidad de giro en los accesos con salidas a la vía más cercana o en el caso del acceso Norte-Sur, a la probabilidad de seguir la ruta por la autopista sur o la carrera 30, dichos datos (tabla No.43) resultaron del promedio de los datos de entrada.

Tabla 43 Probabilidad ruta

Acceso	Autopista sur	Carrera 30	Occidente-oriente	Sur-Norte	Oriente-occidente
Norte-sur	0.5375	0.45	0	0	0.0125
Occidente-oriente	0.12	0.09	0.79	0	0
Sur-Norte	0	0	0.06	0.94	0
Oriente-occidente	0	0	0	0.14	0.86

La proporción agente de cada raza en los diferentes accesos como se señala en la tabla No.44.

Tabla 44 Proporción razas

Acceso	agresivo	pasivo
Norte-sur	0,273684211	0,726315789
Occidente-oriente	0,210526316	0,789473684
Sur-Norte	0,905263158	0,094736842
Oriente-occidente	0,909473684	0,09052632

5.2.1.1.Escenario No.1

Para el primer escenario se pretende establecer una base de contraste con los demás escenarios, por lo que se introducen los datos de entrada de contexto real observado en el trabajo de campo, es decir, distribuciones de velocidad, tiempo de reacción, espaciamiento entre vehículos y tiempo entre arribos hallados.

Para los escenarios siguientes, el objetivo consistió en evaluar el impacto de las variables del comportamiento vehicular identificadas abstraídas previamente de la revisión de literatura.

5.2.1.2.Escenario No.2

En el segundo escenario, se buscó aproximar el impacto de los sobrepasos de vehículos en la capacidad de la vía. Por lo que se supuso que ninguno de los vehículos sobrepasa a otro automóvil, aunque la oportunidad se presentase, es decir, se parte del modelo de car-following, priorizando el movimiento a control longitudinal sobre el control lateral.

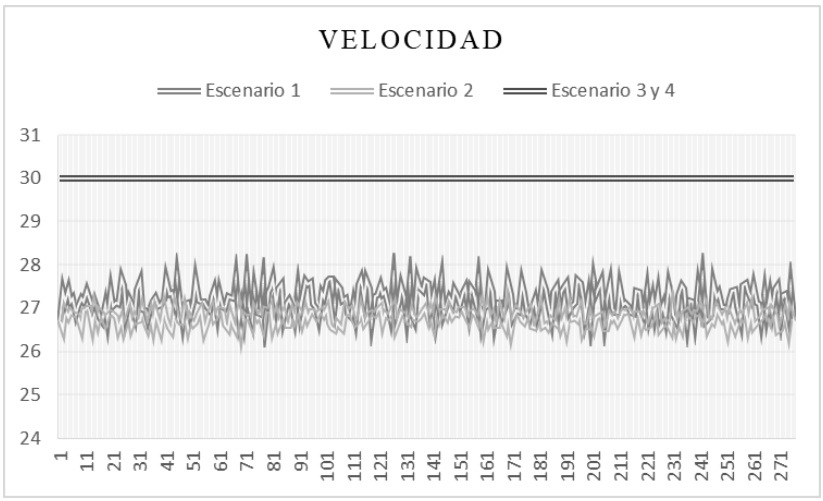
5.2.1.3.Escenario No.3

En este contexto, el objetivo a diferencia del escenario 2 planteado, consistió en la observación de la variación del sistema bajo el supuesto que ningún vehículo sobrepasaba la velocidad máxima disponible en una intersección, dicho valor es de 30 kilómetros por hora según lo establecido en el código nacional de tránsito.

5.2.1.4.Escenario No.4

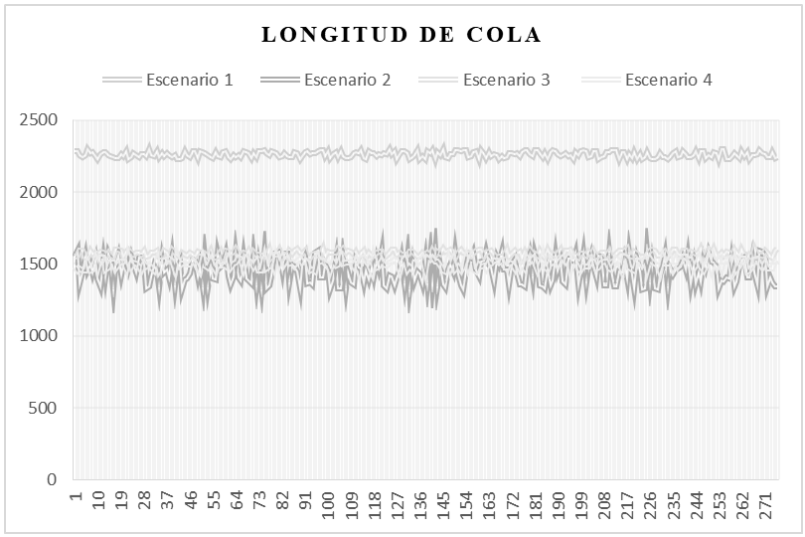
En el último escenario planteado, se programó la simulación unificando el escenario 2 y 3. De esta manera se analizó el resultado de no superar la velocidad promedio y no sobrepasar vehículos.

El resultado de los escenarios planteados sobre las variables que se tomaron como factor de evaluación, arrojaron rangos de velocidad muy cercanos, por lo que el impacto de variar la velocidad no es el suficiente considerando la influencia sobre la carga de la vía que tiene el sobrepasar o no a un vehículo. La metodología para los valores de velocidad promedio analizados consistió en por cada ciclo de semáforo promediar las velocidades arrojadas por el software.



Grafica No 34 variación velocidad según escenario

Para el caso de la longitud de cola, análogamente con la velocidad, el rango de los resultados en cada escenario evaluado no varía significativamente. Los resultados se presentan en la gráfica No.36.



Grafica No 35 variación longitud de cola según escenario

En el análisis de la longitud de cola se procedió a identificar el número de vehículos en cada acceso, utilizando el contador integrado a la simulación, conociendo la equivalencia de 1 pixel en metros y el tamo de pixel por cada automóvil, a este valor de cola en metros se adiciona el espaciamiento entre vehículos promedio ponderado por acceso y raza de agente, como se muestra en la tabla No.45.

Tabla 45 promedio espaciamiento por acceso y tipo de raza

Acceso	agresivo	pasivo
Sur-Norte	0,905263158	0,094736842
promedio espaciamiento	3,90	2,36
promedio ponderado		3,75788345
Norte-sur	0,273684211	0,726315789
promedio espaciamiento	1,39	1,87
promedio ponderado		1,740733321
Occidente-oriente	0,210526316	0,789473684
promedio espaciamiento	1,26	1,33
promedio ponderado		1,312261004
Oriente-Occidente	0,909473684	0,09052632
promedio espaciamiento	3,84	2,01
promedio ponderado		3,676684953

Respecto a las demás variables planteadas, se resalta que:

- Para la variable tiempo de reacción, en el software se precisaban algunas distinciones complejas en medición como el momento exacto en que se inicia el cálculo, la ubicación del conductor en la cola generada y características de orden psicosociológico, conductual y de respuesta a cambios en el entorno.

  Se resalta la potencial utilidad de integrar este factor en futuras investigaciones correspondientes al comportamiento vehicular.

- El espaciamiento entre vehículos, se incluyó en el análisis de la longitud de cola con el procedimiento anteriormente descrito (promedio ponderado).
- En relación con el respeto al semáforo, la cantidad de infractores de este tipo fue poco significativa, de igual manera, se presentan distinciones complejas como precisar si el conductor a la determinada velocidad en la que conducía observo el semáforo en amarillo o el semáforo ya se encontraba en rojo.

5.3.Análisis de escenarios

Si se considera la finalidad de la simulación basada en agentes, como una proyección de un fenómeno y los posibles resultados tras variar factores con alta influencia, se presenta a continuación las potenciales situaciones y comportamientos emergentes derivados del análisis de los escenarios planteados.

Inicialmente, el primer escenario presenta una prospectiva de la intersección AV.NQS calle 8 sur sin intervención alguna, la primera circunstancias emergentes que se señala es el cruce entre los vehículos del acceso oriente y el acceso norte al final el ciclo de semáforo, la emergencia inicia en el cambio a luz amarilla del semáforo del acceso oriente, ya que aunque por código de tránsito, la luz amarilla es un preparativo para el cambio de luz, sea verde para el arranque o rojo para frenar, en este caso específico, el ultimo pelotón cruza en luz amarilla cuando en paralelo, en el acceso norte el semáforo cambia a verde, por lo que se genera un cruce entre el ultimo pelotón del acceso oriente en aprovechar el ciclo de semáforo y los vehículos del acceso norte más próximos.

De lo anterior, se suscita la discusión sobre los semáforos, elementos recurrentes en el distrito para el control del tráfico, como germen de futuro en el tema de movilidad y aunque la tendencia es eliminar el control por luz de las vías para permitir un flujo libre de vehículos (el espectador,2016) se señala la necesidad de realizar mejoras en la red de semaforización del orden de actualización a semáforos inteligentes o bajo control por demanda o la posible eliminación de la luz amarilla y la modificación de la duración de los colores restantes (El tiempo,2012).

Otra de las situaciones emergentes producto del escenario con condiciones reales es la obstrucción de las salidas de cada acceso, se distingue en este caso, los vehículos que se ubican en el carril próximo a la salida, pero lo preceden automóviles en cola para continuar la ruta y los vehículos que no se encuentran próximos a la salida y realizan cruces indebidos por los carriles restantes hasta lograr tomar la ruta deseada. En los accesos con menor cantidad de agentes agresivos, como el acceso norte y el acceso occidente se presentan menos cruces de carril frente a los accesos donde la proporción se invierte.

Con relación a lo obtenido en los escenarios propuestos, es visible una disminución notable en la longitud de vehículos en cola promedio al variar tanto sobrepaso de automóvil

como velocidad, obtenido el mínimo valor de cola en el escenario sin sobrepasos (escenario 2) y la mayor longitud en el escenario donde la máxima velocidad (escenario 3) es la permitida por el código de tránsito, como se presenta en la tabla No 46.

Tabla 46 Resultados medidas de desempeño por escenario

Escenario	Velocidad promedio	Longitud de cola promedio
Escenario 1	27,18141739	2260,24609
Escenario 2	26,76905217	1450,09902
Escenario 3	29,9952	1572,43754
Escenario 4	29,9952	1499,61348

Respecto a la variable velocidad, los resultados arrojaron rangos de velocidad muy cercanos, aunque las variaciones notables se presentaron al no permitir sobrepaso de vehículos, sin embargo, se identifica un impacto de las variables de orden comportamental analizadas. Cabe resaltar a su vez, que, aunque se presenta una mejora en las medidas de desempeño los valores de la longitud de cola siguen siendo elevados para una vía principal para el distrito como la intersección en estudio.

5.4.Validación del modelo

5.4.1. Análisis de datos de salida

Para el análisis de salida las simulaciones se pueden clasificar como terminales o no terminales, según el criterio que determina la ocurrencia del tiempo en que tengan que finalizar. Como lo describe Centeno A. En su libro introducción a la simulación discreta (Centeno & Méndez, 2015). Dado que la simulación realizada no presenta un criterio de parada, se cataloga como una simulación no terminal. Estas condiciones están sujetas a dos condiciones muy importantes a llevar a cabo con cualquier modelo de simulación, la verificación y la validación. A continuación, se describen brevemente en qué consisten:

- **Verificación:** Consiste en la verificación de aspectos importantes del modelo, tales como la longitud de la corrida, y el número de réplicas necesarias teniendo en cuenta el nivel de confianza establecido previamente.
- **Validación:** Consiste en la evaluación de los resultados arrojados por el modelo con los datos reales e históricos del sistema simulado. A partir de esto también se procede a realizar comparaciones entre los escenarios.

Cabe resaltar que, debido a la complejidad del sistema modelado, al ser un fenómeno de orden social, son variadas las variables simuladas y en gran parte no se dispone de la información histórica detallada por lo que se trabajó con la velocidad promedio y la longitud de cola como medidas de desempeño.

5.4.2. Medidas de desempeño

Uno de los aspectos más importantes al realizar una simulación consiste en la correcta elección de las medidas de desempeño. Este hecho se justifica en que de una adecuada selección de las mismas depende una apropiada evaluación del sistema. En este caso y teniendo en cuenta tanto las limitaciones computacionales que hasta la fecha se presenta en el software utilizado (Net Logo), y las características propias del sistema se establecieron las siguientes medidas de desempeño:

- **Longitud de la cola**: Uno de los mayores indicadores de movilidad con los que cuenta la secretaria Distrital de Movilidad es la longitud de la cola en el ciclo de semáforo. Entre mayor sea este valor, mayor es el atascamiento presentado, hasta el punto de alcanzar valores críticos, al sobrepasar la capacidad de la vía calculada, razón por la que se escogió la intersección acá representada, ya que hace parte de las diez intersecciones priorizadas por el distrito.

  Es importante señalar en este punto que todas las variables del modelo y del comportamiento de cargas influyen directamente en este valor. Por lo que se convierte en una medida de desempeño claramente representativa del sistema, y proporciona valiosa información para la toma de decisiones, no solo enfocadas a campañas o medidas con el fin de modificar el comportamiento vehicular, sino que también influye en operaciones adicionales, tales como cambios en los ciclos de los semáforos, obras y mantenimientos de la malla vial, e incluso temas relacionados con el material utilizado y demás aspectos asociados con el tema de cargas en el transporte terrestre.
- **Velocidad Promedio**: Uno de los mayores problemas que tiene la ciudad es el incumplimiento de los límites de velocidad (El tiempo, 2016). Según el código nacional de tránsito y transporte terrestre (ley 789 de 2002) La velocidad máxima a la hora de cruzar una intersección semaforizada es de 30 km/h. Sin embargo, son

pocos los conductores que respetan esta norma de tránsito, como se concluyó tras la decodificación de los videos tomados en dicha intersección, por lo que una de las principales medidas de desempeño que se pueden obtener es la velocidad promedio, ya que no solo es una variable que permite determinar el nivel de congestión, sino también establecer el nivel de cumplimiento existente hacia la normativa por parte de los actores viales en Bogotá.

5.4.3. Longitud de la corrida.

Existen varios métodos cuando se habla de determinar la longitud de la corrida en sistemas no terminales, el principal de ellos relaciona el estado estable del sistema el cual hace parte de este cálculo. Al correr la simulación Net Logo empieza a borrar todos los datos del mundo y de los agentes, a continuación, empieza con la simulación, pero es justo después de que se cumple el primer ciclo del semáforo que se estabiliza el sistema.

- Desde este punto de vista, la simulación deberá empezar a correr una vez haya transcurrido un ciclo o cambio de semáforo. Ahora bien, después de definir desde que punto se va a iniciar la simulación, se correrá aleatoriamente en diferentes espacios del tiempo una vez se cumpla con la condición de estado estable, por el largo de otro ciclo de semáforo. Lo anterior se sustenta en que, durante este intervalo de tiempo, se actualizan de forma adecuada los valores de las medidas de desempeño, sin incurrir en errores computacionales, y respetando los límites y restricciones que arroja el modelo y el software utilizado.
- Para poder contrastar estos datos, con los obtenidos en campo durante la realización del estudio, los ciclos de semáforo resultan bastante útiles, para la toma de información y decodificación del material audiovisual usado.

5.4.4. Numero de replicas

Utilizando una premuestra de 10 réplicas de la simulación para las medidas de desempeño, se obtuvieron los datos necesarios para calcular el número de corridas. Para este cálculo se utilizó la siguiente relación (García & García 200).

$$n = (\frac{S}{\in}\left(t_{\frac{\alpha}{2},n-1}\right))^2$$

En donde,

- S representa la desviación estándar
- ∈ representa el nivel de precisión,
- El valor $t_{\frac{\alpha}{2},n-1}$ es el valor critico de las tablas t de student con $\frac{\alpha}{2}$ y n-1 grados de libertad.

En la tabla No.46 se presentan los datos obtenidos para las dos medidas de desempeño en la premuestra de 10 datos

Tabla 47 medidas de desempeño en la premuestra

n	Velocidad (m/s/10)	n	Longitud de cola (mts)
1	0,3887	1	1681,44
2	0,3872	2	1849,04
3	0,3833	3	2177,33
4	0,3559	4	1835,56
5	0,401	5	1931,63
6	0,3688	6	1845,79
7	0,3781	7	1979,93
8	0,3655	8	1821,6
9	0,3634	9	1792,84
10	0,3844	10	2022,61

Ahora bien, se establece tanto la desviación estándar como la precisión dentro del estudio, datos que se relacionan a continuación:

N	10
ϵ	0,01
T	2,26

Después se procede a calcular el tamaño de la muestra según la relación anteriormente mencionada. Los resultados que se obtuvieron se presentan en la tabla No.47

Tabla 48 Numero de replicas

No. replicas	velocidad	Longitud
desviación	0,013897566	139,0577834
N	18,79702533	275,3910408

Dado que para la medida de desempeño longitud de cola el número de réplicas es de 275, y es un número mayor que para la velocidad promedio, se escoge el valor más alto. Es decir, se concluye un número de réplicas de 276.

5.4.5. Validación

Una vez obtenidos los datos para las 276 réplicas necesarias para la simulación, se procede a la primera comparación que permitirá valorar si el modelo de simulación planteado realmente representa o se aproxima al sistema objetivo de la simulación. Para lograr esta tarea, se procede a utilizar el software SPSS de IBM. Estos datos y los cálculos realizados se encuentran el archivo Excel adjunto, denominado anexo b: Tratamiento estadístico de salida.

La prueba utilizada se denomina prueba Anova de un Factor y para ello se establece la siguiente hipótesis nula:

Ho: El sistema real y el sistema simulado son homogéneos entre si y por lo tanto representan el mismo comportamiento.

Para que la prueba sea rechazada el valor de significancia debe ser inferior a 0,05, de lo contrario la hipótesis no será rechazada, y podrá ser aceptado el hecho de que los datos son homogéneos entre si validando el modelo realizado.

A continuación se muestran los resultados para la prueba Anova de un factor realizada entre los datos simulados y los datos históricos disponibles[1] de velocidad promedio:

ANOVA					
escenario1					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	22,123	260	,085	1,759	,102
Dentro de grupos	,726	15	,048		
Total	22,849	275			

[1] Los datos históricos disponibles fueron tomados del aplicativo web http://simur.gov.co/, durante el mes de febrero en cual se realizaron las observaciones. La velocidad promedio arrojada por el aplicativo oficial de la secretaria de movilidad de Bogotá fue tomada y registrada en el archivo Excel anexo b. En el cual también se incluyen los datos obtenidos al simular el sistema, con los escenarios establecidos más adelante.

Como se puede observar en la tabla el nivel de significancia es mayor a 0,05 por lo que no se rechaza la hipótesis nula, y es válido desde el punto de vista estadístico afirmar que el comportamiento de ambos sistemas es homogéneo y representan el mismo comportamiento.

Otra comparación importante a tener en cuenta es la relacionada con la longitud de cola entre los datos simulados y la proporcionada por la secretaria distrital de movilidad. En este caso, cabe recordar que este valor es de 2259 m de cola. El cual tiene en cuenta el promedio de vehículos en la cola, la longitud o espacio que ocupa cada uno, pero también el espacio promedio que se da en este promedio. Ahora bien, para realizar este cálculo con los datos simulados, se utilizó el mismo procedimiento establecido por la secretaria para el cálculo de esta media de desempeño.

Para realizar esta comparación se utiliza el intervalo de confianza, sí el valor de la secretaria distrital de movilidad se encuentra entre estos dos valores, entonces se acepta la hipótesis nula de que los sistemas representan el mismo comportamiento y población.

Este cálculo se resume en la tabla No 48:

Tabla 49 Intervalo de confianza longitud de cola

Intervalo de confianza	
Media	2260,246087
desviación estándar	20,33924618
t	1,645
l. Inferior	l. Superior
2258,232148	2262,260026

Dado que el valor de la secretaria de movilidad 2259 m de longitud de cola, está dentro del intervalo se afirma que el sistema simulado representa el real, y puede ser contrastado con datos históricos como este.

Para la comparación entre escenarios se procederá a utilizar el test t para datos pareados el cual aplica las siguientes relaciones:

$$\bar{Z}(n) = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n} z_n$$

$$S^2(z) = \frac{1}{n-1}\left[z_j - \bar{z}(n)\right]^2$$

$$Intervalos = \bar{Z}(n) \pm t_{n-1,1-\alpha/2}\frac{S(z)}{\sqrt{n}}$$

El criterio de decisión se relaciona directamente con los intervalos, si contiene a 0 se afirma que son escenarios iguales, por el contrario, si no contiene a 0 se afirma que los sistemas son diferentes entre si

La primera comparación estadística realizada es la del escenario real simulado vs el escenario que contempla que los conductores en Bogotá no realizan sobrepasos de forma arbitraria e imprudente. Para contrastar estos dos escenarios, se utilizó la velocidad promedio como punto de comparación. La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos para la prueba t de datos pareados:

Tabla 50 Prueba t de datos pareados escenario real Vs escenario 2

Prueba t	
Media	0,005721739
desviación estándar	0,004627762
T	1,645
I. Inferior	I. Superior
0,00526351	0,006179968

Dado que el intervalo entre el límite inferior y el límite superior no contiene a 0. Se puede afirmar que los dos sistemas o escenarios son diferentes, lo que ratifica como escenario de simulación. La segunda comparación realizada es el escenario real simulado vs el escenario en que los conductores En Bogotá respetan los límites de velocidad establecidos por el código nacional de tránsito y transporte. En este caso el parámetro utilizado fue el de velocidad promedio, datos arrojados después de hacer las 276 réplicas necesarias. Estos resultados se resumen en la tabla No 50.

Tabla 51 Prueba t de datos pareados escenario real Vs escenario 3

Prueba t	
Media	-0,03908587
desviación estándar	0,004003433
T	1,645
I. Inferior	I. Superior
-0,039482279	-0,03868946

Nuevamente, dado que el intervalo comprendido entre el límite superior y el límite inferior expresados en la tabla no contiene el valor 0. Se puede afirmar que ambos sistemas son diferentes. Lo que comprueba que el escenario 3 puede llegar a ser considerado como un escenario de simulación valido desde el punto de vista estadístico.

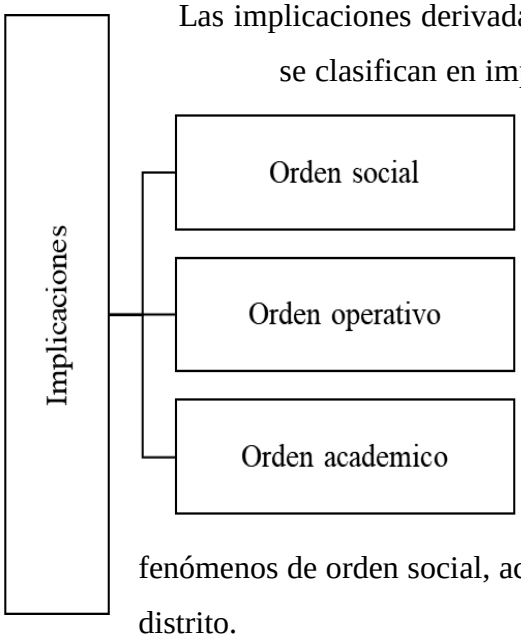
Finalmente se realizó la comparación correspondiente al escenario real simulado vs el escenario ideal. En el cual las personas respetan las normas y sugerencias establecidas por el código nacional de tránsito y transporte. Para lograr este objetivo se utilizó la medida de desempeño denominada longitud de cola. la siguiente tabla muestra los resultados generados a partir de dicha comparación:

Tabla 52 Prueba t de datos pareados escenario real Vs escenario 4

Prueba t	
Media	760,6326087
desviación estándar	38,01142456
t	1,645
I. Inferior	I. Superior
756,8688176	764,3963998

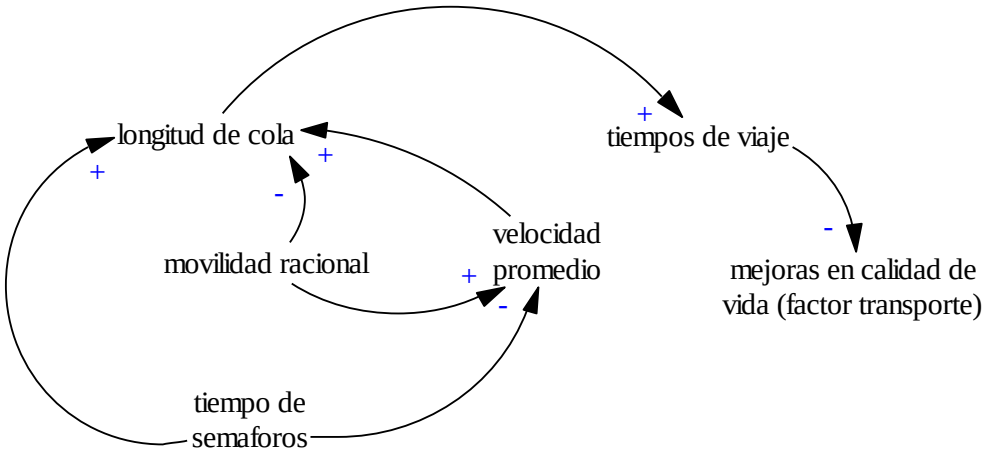
Finalizando este apartado, dado que en el intervalo comprendido entre el límite inferior y el límite superior no contiene el valor de 0, se afirma que ambos escenarios o sistemas son diferentes. Estas comparaciones se realizaron de esta forma para garantizar que los sistemas o escenarios planteados, sean estadísticamente diferentes entre ellos y por lo tanto sean válidos en la simulación.

5.5.Implicaciones y recomendaciones



Las implicaciones derivadas de la realización del presente trabajo de investigación se clasifican en implicaciones de orden social, operativo y académico. Para el primer conjunto se busca contrastar, mediante herramientas de la dinámica de sistemas y continuando con la metodología de diagramas causales, resaltando el alcance del proyecto. Para las implicaciones de orden operativo se plantean propuestas alcanzables resultado del análisis aquí desarrollado, por último, se realiza una apreciación sobre la posibilidad en el campo de la ingeniería industrial de contribuir a fenómenos de orden social, acorde con la misión institucional de brindar soluciones al distrito.

Respecto a las implicaciones de orden social, se identifica en primera instancia que con una reducción en el ciclo de semáforo para peatones es posible el aumento del pelotón de vehículos que aprovechan la luz verde, lo que a la larga podría repercutir en el aumento de la velocidad promedio y la disminución de la longitud de cola del tramo analizado, al ocurrir lo anterior los tiempos de viaje presentarían una disminución, siendo este un factor a considerar dado el alto valor de estos actualmente, un promedio de 70 minutos (UniAndes,2016), aumentando a su vez la calidad de vida de los habitantes (Alcadia mayor de Bogotá,2015).



Grafica No 36 implicaciones de orden social

De los resultados obtenidos de la simulación, se comprueba la hipótesis planteada de la inclusión de variables del comportamiento vehicular a modelos de ocupación de vías, específicamente a los métodos utilizados en Bogotá, representa una posible mejora para establecer condiciones más cercanas al contexto real, para el presente proyecto, las intersecciones vehiculares con intervención priorizada en el distrito capital.

De lo anterior derivan las posibles acciones correspondientes a efectuar por las instituciones responsables considerando las posibles áreas de intervención y la integración academia-estado, dado que investigaciones de este orden aportan conocimiento y aprendizaje continuo del sistema, en este caso la ocupación real de la intersección AV. NQS calle 8 sur. Las posibles acciones que se proponen están orientadas a:

- Creación de programas pedagógicos y capacitaciones orientadas a una movilidad racional y sostenible
- Correcta difusión de la red de vías en el distrito, a fin de aprovechar en la totalidad los proyectos de infraestructura que se realizan o que se proyectan a ejecutar.
- Aumento en el control y atención al tráfico, reduciendo tiempos de atención entre choques simples, inspección regular del estado de la vía y de la red de semaforización.
- Mejoras en el sistema integrado de transporte público, con el objetivo de disminuir en la medida posible el uso de vehículo privado, considerando que por un solo automóvil ocupa en vía la equivalencia de 11 pasajeros en un transporte público, para esto han de analizarse los factores actuales que llevan a la preferir el transporte particular sobre el público.

6. CONCLUSIONES

El propósito del presente trabajo de investigación consiste en la identificación del impacto del comportamiento vehicular en el cálculo de carga vial, estableciendo como zona de estudio la intersección Av.NQS con calle 8 sur priorizada por el distrito a causa de la demanda que sobrepasa la capacidad de la vía, para dicho objetivo se observó el sistema de forma global y luego detallada, para identificar el problema de análisis, estableciendo variables seleccionadas tras la recolección de información y la abstracción de conceptos de fuentes bibliográficas del tema.

Usando simulación basada en agentes se representó la intersección mencionada, recreando las condiciones actuales, datos que se obtuvieron durante el trabajo de campo realizado en el que se recopiló información del tráfico en el sector durante aproximadamente un mes a diferentes horas del día (Ver anexo A), de esta primera parte de desarrollo se concluye:

- Al obtener los datos de entrada correspondientes a las variables evaluadas se identifica una posible dependencia del comportamiento vehicular a los cambios en las condiciones climáticas y del entorno, como momento del día, diferenciando entre horas valles y picos y día de la semana.
- El proceso de decodificación de los videos tomados para obtener toda la información correspondiente al análisis de entrada, se ve facilitado en la medida del surgimiento de herramientas gráficas y computacionales, que permitan realizar esta tarea de una forma más eficiente y menos manual.

Después de realizar el análisis de entrada (haciendo uso de la estadística descriptiva), el desarrollo del modelo y el análisis de salida se concluye que:

- Existen características y variables de entrada muy propias del comportamiento vehicular que no se pueden representar como una función de densidad de probabilidad conocida, por lo que se recurre al uso de distribuciones empíricas. Desde este punto de vista se plantea como un reto a futuras investigaciones el establecimiento de funciones de densidad de probabilidad, con parámetros definidos que muestren de una mejor forma estas características.

- Una de las causas de la ocupación desproporcionada de las vías y problemas relacionados con la carga vehicular tiene que ver con desconocimiento del sistema, la falta de estudios y trabajos académicos y operativos que proporcionen herramientas para una adecuada gestión. Es por esto, que es fundamental el desarrollo de trabajos futuros referentes a la carga vehicular, la relación con factores comportamentales, y las implicaciones en el sistema de movilidad.
- Es necesario estudiar los factores que influyen en la elección y preferencia de los ciudadanos por el vehículo particular sobre el uso sistema de transporte público de la ciudad, y el uso de la bicicleta; con el fin de poder influir en el sistema de preferencia de una forma más eficiente.
- Se estableció que la velocidad, el tiempo de reacción, el respeto por la cebra, el respeto por el semáforo, el histórico de comparendos y el respeto por el carril son las variables globales que influyen en el comportamiento vehicular en Bogotá.
- Se identificó que las medidas de desempeño claves del sistema son: la longitud de la cola, y la velocidad promedio en la que los conductores atraviesan la intersección, a partir de dichas medidas de desempeño se relacionan las variables planteadas en el modelo.
- Al establecer escenarios de respeto por las normas de tránsito, como la velocidad, respeto por el carril, la cebra y el semáforo, se evidencia a lo largo de todas las réplicas realizadas un mejor desempeño del sistema, reduciendo notablemente los niveles de congestión y tamaño de la cola, y otras consideraciones adicionales, como menores índices de accidentalidad, y mejora del flujo vehicular.
- El uso de la ingeniería industrial no se restringe a aplicaciones de tipo productivo y operativo, se extiende a todo tipo de problemáticas incluso de tipo social. Una clara muestra de esto se evidencia en el trabajo acá presentado, que hace uso de simulación basada en agentes, para representar una problemática con implicaciones de tipo social, operativo y académico.

6.1.Trabajos futuros

Se pone de manifiesto que, aunque el modelamiento de fenómenos de orden social como el comportamiento vehicular utilizando lógica de agentes resulta complejo y extenso, la potencial utilidad de los resultados abarca desde el conocimiento y constante aprendizaje del sistema como la evaluación de estrategias eficientes que se traduzcan en una movilidad racional y sostenible en el distrito.

Con este trabajo se dejan abiertos varios campos de investigación y se proporciona una gran cantidad de ideas para trabajos de investigación futuros, en temáticas de preferencia, cálculo de cargas y modelamiento de sistemas de movilidad incluyendo factores de orden comportamental.

REFERENCIAS

1. Aathira T Dev, S Udhayavene & K Chandrasekaran. An approach to reduce Vehicular Congestion (2015) National Institute of Technology
2. Acevedo, Jorge. El transporte como soporte al desarrollo de Colombia: una visión al 2040 (2009)
3. Aguilar, C. simulación de sistemas. Pontificia universidad de Chile. Santiago de Chile.1997
4. Ahmed, K. I (1999) Modeling Drivers' Acceleration and Lane-Changing behaviour. PhD. dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge
5. Altepeter (2004) The Emergent Behaviour of Traffic
6. Ardila Gómez, Arturo. Control de la congestion vehicular en Bogotá con herramientas microeconómicas (1995) Universidad de los andes, Colombia
7. Arroyo Menéndez, Millán y Hassan Collado, Samer y Pavón Mestras, Juan y Sansores, Candelaria (2006) *Simulación de sistemas sociales con agentes software.* In Una perspectiva de la inteligencia artificial en su 50 aniversario: Campus Multidisciplinar en Percepción e Inteligencia. Universidad de Castilla-La Mancha, Albacete, pp. 389-400. ISBN 84-689-9561-4
8. Bosch. Regulación adaptiva de la velocidad de marcha ACC. 2003
9. Bull, Alberto & Thomson Ian. La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales. (2012)
10. Canavos, G. C., & Medal, E. G. U. (1987). Probabilidad y estadística. McGraw Hill.
11. CEPAL. División de Recursos Naturales e Infraestructura. La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales. 2002
12. Cerquera Escobar, Flor Ángela. capacidad y niveles de servicio de la infraestructura vial. (2007). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia
13. Centeno, M. A., Méndez Giraldo, G., Baesler Abufarde, F., & Álvarez Pomar, L. (2015). ED. UDFJC
14. Chakroborty Partha. Models of vehicular traffic: An engineering perspective (2006)
15. Chung, K., Rudjanakanoknad, J. & Cassidy, M. J. (2007) Relation between traffic density and capacity drop at three freeway bottlenecks. Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 41, no. 1, pp. 82-95.

16. Cunha Felipe; Carneiro Aline; Raquel Vianna.: How effective is to look at a vehicular network under a social perception? IEEE Explorer Web. http://ieeexplore.ieee.org/document/6673355/ (2013) acceded October 24,2016
17. Davidysson A. Alvarenga, Felipe D. Cunha2, Aline C. Viana Raquel A. F. Mini, Antonio A. F. Loureiro. Classificando Comportamentos Sociais em Redes Veiculares. (2016)
18. Egea Caparrós Amaro. El comportamiento humano en conducción: factores perceptivos, cognitivos y de respuesta. Universidad de Murcia
19. European Conference of Ministers of Transport. Gestión de velocidad.2009
20. Fiore, Marco.: The networking shape of vehicular mobility. Ninth ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, pp 261–272 (2008).
21. García D. E., García R.H., & Cárdenas B.L., (2006) Simulación y análisis de sistemas con Promodel. Pearson ED
22. García-Valdecasas Medina José Ignacio. La simulación basada en agentes: una nueva forma de explorar los fenómenos sociales.2011
23. Gazis, R. Herman, R.W. Rothery (1961). Nonlinear follow the leader models of traffic flow. Operations Res. 9, 545-567.
24. Highway Capacity Manual (2000). Washington D.C., Transportation Research Board
25. Hillier, F. S. A. L., & Lieberman, G. (2010). Introduction to mathematical programming. McGraw Hill.
26. Impacts of the driver's bounded rationality on the traffic running cost under the car-following model. Physical A: Statistical Mechanics and its Applications, 457, 316-321
27. Kerner (2009). Introduction to modern traffic flow theory and control (Springer, Berlin)
28. Lebacque, J; Intersection Modeling, Application to Macroscopic Network Traffic Flow Models and Traffic Management, Traffic and Granular Flow ’03. Springer, Berlin, Heidelberg. pp 261-278 (2005)
29. Liu, F., Cheng, R., Ge, H., & Yu, C. (2016). A new car-following model with consideration of the velocity difference between the current speed and the historical

speed of the leading car. Physical A: Statistical Mechanics and its Applications, 464, 267-277.

30. Loulloudes, Nicholas; Pallis, George; Dikaiakos Marios. : The dynamics of vehicular networks in urban environments. arXiv Web .arXiv:1007.4106, (2010) acceded April 12, 2017.
31. M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, Y. Sugiyama (1995). Dynamical model of traffic congestion and numerical simulations. Phys. Rev. E 51, 1035-1042
32. Mathew, Tom; Krishna Ra, K V: Microscopic traffic flow modeling. Introduction to Transportation Engineering. NPTEL, pp 34.1-39.4 (2007)
33. N. Bellomo and C. Dogbe, on the modeling of traffic and crowds: A Survey of models, speculations, and perspectives, SIAM Review, 53 (3), pp. 409-463 (2011).
34. Naranjo Herrera, Víctor Hugo. Análisis de la capacidad y nivel de servicio de las vías principales y secundarias de acceso a la ciudad de Manizales (2008). Universidad Nacional De Colombia Sede Manizales
35. Newman, Mark. Assortative mixing in networks. Physical review letters, Vol.89, No.20, pp 20870 (2002).
36. Olga R. Romero Q., Mauricio Becerra F., Milton M. Herrera R., Johanna Trujillo D. Simulación del tráfico de la carrera séptima en Bogotá D.C. Colombia, entre calles 34 y 72 utilizando dinámica de sistemas (2011)
37. Ordóñez Moss, Guillermo Augusto. Aplicación Del Manual De Capacidad De Carreteras (Hcm) Versión 2,000, Para La Evaluación Del Nivel De Servicio De Carreteras Multicarriles (2009). Universidad De San Carlos De Guatemala
38. Ossen, S. J. L. (2008) Longitudinal Driving Behaviour: Theory and Empirics, TRAIL Thesis Series PhD thesis, Delft, Delft University of Technology.
39. P. Berg, A. Mason, and A. Woods, Continuum approach to car-following models, Phys. Rev. E, 61 pp. 1056-1066 (2000).
40. Peng, G., Lu, W., & He, H. (2016). Nonlinear analysis of a new car-following model accounting for the global average optimal velocity difference. Modern Physics Letters B, 1650327
41. Prajakta Desai, Seng W. Loke, Aniruddha Desai, & Jack Singh. Multi-Agent Based Vehicular Congestion Management (2011) La Trobe University, Australia

42. Quezada Ariel, Canessa Enrique. Modelado basado en agentes: una herramienta para complementar el análisis de fenómenos sociales-2007
43. Redacción de Negocios y Economía. El parque automotor en Colombia supera los 12’600.000 unidades. (2016). El espectador.
44. República de Colombia Gobierno Nacional; Código de tránsito de Colombia. Diario oficial. Año cxxxviii. N.44932. 13, septiembre, 2002.
45. Rodríguez, R., 2002, Modelación de flujo de tránsito de autos utilizando autómatas celulares. Departamento de Aplicación de Microcomputadoras, Instituto de Ciencias,
46. S.P. Hoogendoorn and P.H.L. Bovy, State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling: in Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: in Journal of Systems and Control Engineering, 215, pp. 283-303 (2001).
47. Tang Tie-Qiao, Huang Hai-Jun, Wong S. C. & Jiang Rui. A new car-following model with consideration of the traffic interruption probability. 2009
48. Thakur, Gautam; Hui, Pan; Helmy, Ahmed: The structure and traffic flow anatomy of the planet-scale urban vehicular mobility. Networking Science, Vol. 3, No. 1-4, pp 13–23 (2013),
49. Travieso, Gonzalo; Ribeiro Villas Boas Paulino.: Characterization of complex networks: A survey of measurements. Advances in Physics, pp 167–242 (2007).
50. Urquia Alfonso& Villalba Carla. Modelado y simulación de eventos discretos. Universidad Nacional abierta y a distancia. 2013
51. Vargas-Uberra, J., Cuautepec, U. C., No, C. L. C., La Palma, C. L., Rodríguez-Gómez, G., & Pomares-Hernández, S. E. Monitoreo del tránsito vehicular basado en Mobile Phone Sensing.2016
52. Vegni, Anna Maria 1; Loscri, Valeria 2. A Survey on Vehicular Social Networks (2015)
53. Velasco, L. M. (2004). Calibración de parámetros básicos vehiculares para flujo interrumpido en modelos de simulación microscópica: GETRAM en Santiago (Doctoral dissertation, Tesis de Magíster, Pontificia Universidad Católica de Chile).
54. W. Leutzbach, Introduction to the Theory of Traffic Flow (Springer, Berlin, 1988)

55. X. Liu; Z. Li; W. Li; S. Lu; X. Wang; Chen D.; Exploring social properties in vehicular ad hoc networks. Fourth Asia-Pacific Symposium on Internetware, ser. Internetware ’12. New York, pp. 24:1–24 (2012).
56. Yang Q., Koutsopoulos H.N. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems (1996)