

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LOS TIEMPOS DE SEMÁFOROS SOBRE LA LONGITUD DE LAS COLAS Y TIEMPOS DE TRÁNSITO DE LOS VEHÍCULOS EN LAS DIFERENTES RUTAS DE ACCESO Y SALIDA EN INTERSECCIONES VIALES.

David Andrés Velandia & José Fidel Torres

Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Resumen.

En Bogotá, los tiempos de traslado de las personas entre la ciudad son muy altos comparados al resto del mundo, en algunos casos esto es producto de inteligencia vial por parte de los conductores que provocan accidentes y congestionan las vías, por el déficit de infraestructura con el que cuenta la ciudad, pero también puede ser producto de la baja actualización y mala configuración de los sistemas de control de tráfico actuales. En este trabajo se busca por medio de la simulación y el análisis de datos (machine learning) el desarrollar soluciones rápidas, sencillas y sobre todo económicas a este tipo de problemas, es por eso que se propone por medio de modelos de regresión lineal y alimentados con datos obtenidos por simulación discreta, predecir los tiempos idóneos dentro del ciclo semafórico de un tipo de intersección en particular y de este modo poder generalizarlo entre los cruces del mismo tipo. Todo esto evaluado entre diferentes configuraciones parametrizadas dentro de distintos modelos de regresión y que sea solo uno de ellos quién mejor procese la información y prediga con el menor error posible.

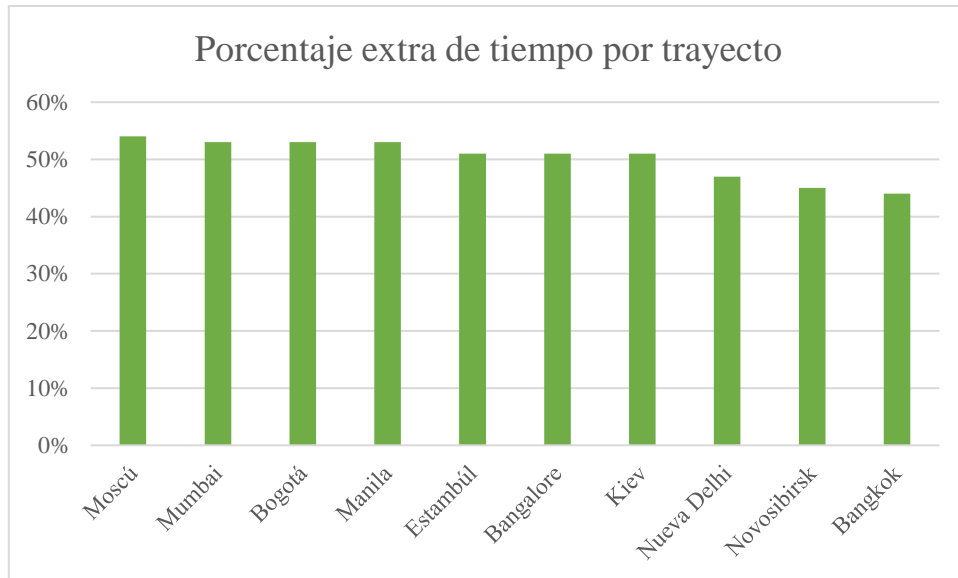
Palabras clave.

Intersección vial, modelo de simulación, ciclo semafórico, regresión lineal, machine learning.

1. Introducción.

En 2020 Bogotá se posicionó como la ciudad más congestionada de todo el mundo (Forbes, 2021), las personas allí pierden alrededor de 133 horas al año en trancones generados por diferentes factores, entre los que están, alto flujo vehicular, poca capacidad en las vías principales, frecuentes accidentes o mala sincronización semafórica, entre otros. Según este mismo estudio, se encontró que las ciudades más pobladas no necesariamente son las más congestionadas o en las que los conductores de vehículos pierden más tiempo, es más, en ciudades como Madrid, España, los conductores solo perdieron 18 horas en el mismo año (2020). A esto se le suma que, en ciudades de Estados Unidos, se encontró que reducir horas de estancia dentro del tráfico, no solo es un ahorro en tiempo para las personas, sino que también es un ahorro económico, llegando a un total en todo el país de cerca de 890 millones de dólares.

En la imagen 1, se muestra como la congestión vial llega a afectar los tiempos en un trayecto determinado, donde se evidencia que, aparte de ser Bogotá la ciudad más congestionada, es la tercera en el mundo donde las personas gastan más tiempo al recorrer un trayecto determinado. Es decir, en Bogotá un día congestionado se puede tardar hasta un 53% extra en el tiempo de recorrido que un día donde la congestión es mínima.



*Imagen 1: Porcentaje extra que gastan las personas por trayecto
Fuente: (Statista, 2020)*

Intentando atacar uno de los factores que puede generar estos altos tiempos de espera, se decidió trabajar en un modelo de simulación cuyo objetivo es el poder determinar la configuración adecuada de los semáforos en una intersección específica de la ciudad de Bogotá, esto con el fin de evaluar el nivel de servicio que se da en esta intersección vial. En esta fase previa, se ha encontrado una amplia bibliografía con artículos que desarrollan problemas similares en contextos parecidos. En un artículo publicado por Mădălin-Dorin Pop en el año 2018 expone los problemas de no tener una buena y ajustada sincronización semafórica, y por medio de la herramienta AnyLogic muestra como por medio de la simulación basada en agentes, se puede reducir las congestiones viales y expone como debería hacerse un ajuste en los tiempos de los semáforos en las intersecciones para aumentar el nivel de servicio en esas vías. (Pop, Traffic Lights Management Using Optimization Tool., 2018)

En algunos países de Latinoamérica, no se cuenta con los recursos suficientes para destinarlos en la mejora de la calidad de las vías, es decir que la capacidad vial es limitada pero el aumento en el parque automotor no se detiene. En el caso particular de Bogotá, su capacidad vial está cerca de los 1'500.000 de vehículos mientras que el parque automotor está rondando los 2'400.000 donde más del 60% son carros particulares y se estima que para el 2025 sean más de 3'080.000 los vehículos que transiten por la ciudad. (Bogotá como vamos, 2020). En la imagen 2 se muestra como ha venido creciendo el parque automotor a lo largo de los primeros 15 años del milenio, allí se puede observar que ese aumento se ha visto representado en su mayoría por vehículos de uso particular y es esa la verdadera preocupación.

Sumado a todo esto, hay que tener en cuenta que en Bogotá se empezó a desarrollar la malla vial que hoy conocemos desde el siglo XIX. Para la segunda década del siglo XX, Colombia contaba con unos 13.000 vehículos circulando en el país, la mayoría de estos se encontraban en la ciudad de Bogotá, es decir, que parte de las vías se diseñaron para flujos reducidos y sin preocupaciones con respecto a congestiones viales (Argos, 2020). Para

finales del siglo XX se consolida la red de carreteras de la ciudad de Bogotá y según un artículo del diario El Tiempo (El Tiempo, 1997) en Bogotá transitaban cerca de 700.000 vehículos por toda la ciudad, adecuando de esta manera todas sus vías para una capacidad cercana al millón de autos. Para el año 2020 se estima que alcanzaron a circular un total de 2'400.000 (Alcaldía de Bogotá, 2020), de esta manera se triplicó la cantidad en los últimos 23 años. Esto está generando un grave problema porque el crecimiento del parque automotor está siendo más alto que el crecimiento de las vías en la ciudad.

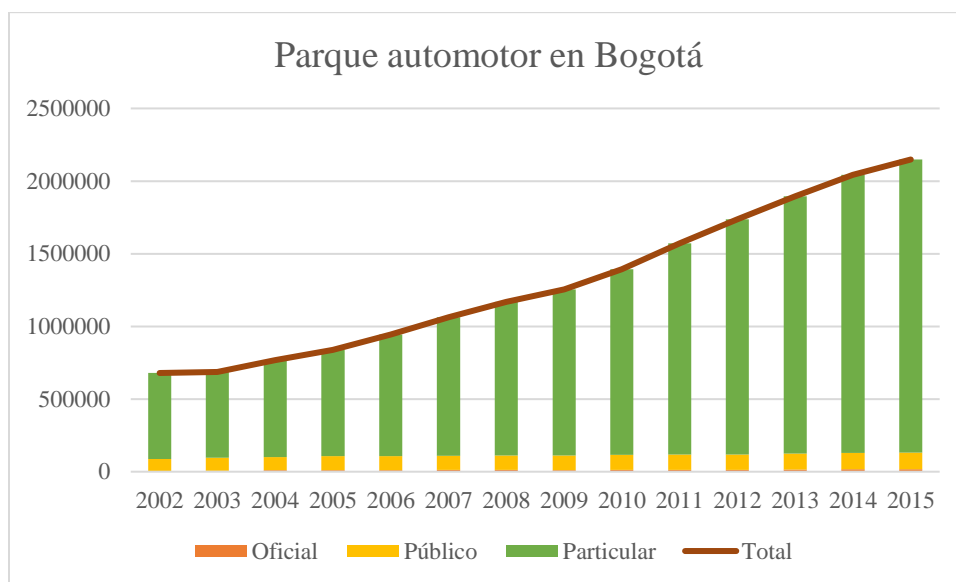


Imagen 2: Crecimiento del parque automotor en Bogotá
Fuente: (Secretaría de Movilidad de Bogotá, 2015)

En un estudio realizado en el año 2003 por el IDU (Instituto de desarrollo urbano, 2003), se encontró que el deterioro de la malla vial se estaba dando de manera progresiva y tal como se muestra en la imagen 3, la cantidad de kilómetros en buen estado disminuiría con el tiempo en los siguientes seis años, mientras que la cantidad de kilómetros que se encontraban en un estado regular, aumentarían de manera significativa y por su parte los kilómetros con un estado malo también aumentarían a un paso más lento.

Teniendo en cuenta lo anterior mencionado, con este trabajo se busca realizar un análisis de la situación actual de congestión vehicular de la ciudad de Bogotá donde se evidencien los impactos sociales, económicos y ambientales que esto genera. Así mismo, se planea desarrollar un modelo de simulación como insumo base para la predicción de los tiempos de ciclo semafóricos con el fin de reducir el tiempo promedio de espera dentro de un tipo de intersección evaluando diferentes escenarios.

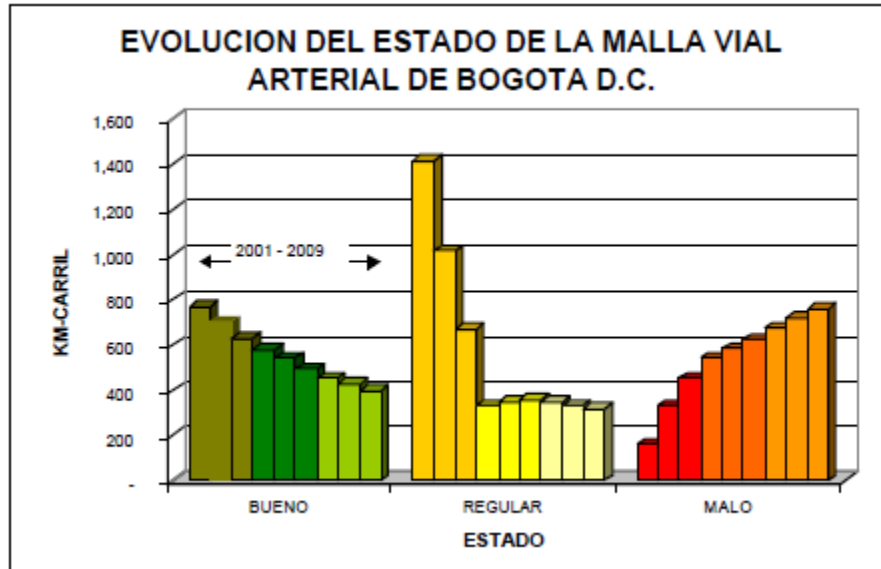


Imagen 3: Evolución del estado de la maña vial arterial de Bogotá D.C
Fuente: (Instituto de desarrollo urbano, 2003)

2. Marco Teórico.

2.1. Tráfico vehicular.

EL tráfico vehicular es definido como el fenómeno generado por el movimiento o la movilización de uno o más vehículos dentro de una vía, camino, calle. Este fenómeno es capaz de impulsar economías, desarrollar sociedades, aumentar la calidad de vida de las personas que hacen parte de éste. El tráfico vehicular se distingue del transito vehicular en el sentido de se capacidad de movilidad, mientras el transito tiene un flujo de vehículos bajo, donde ellos están regidos únicamente por la limitación de velocidad de la vía, el tráfico cuenta con un flujo mucho más alto, y es allí donde se empieza a generar congestión vehicular. (especifica, 2010)

2.2. Congestión vehicular.

Un estudio realizado por la CEPAL, define la congestión vehicular como una condición por la que se pasa cuando en una vía, calle o camino hay bastantes autos en circulación cuyas velocidades son lentas y poco regulares. Así mismo, en la imagen 4, el estudio muestra como se relaciona el tiempo que tarda un vehículo en transitar por una calle y el volumen sobre la calle. Allí se puede ver que cuando el flujo de vehicular es muy bajo el tiempo de transito es constante que en este caso es denominado como t_0 . Antes de que este tiempo empiece a aumentar, el flujo vehicular puede llegar a un nivel llamado q_0 y es a partir de allí que se empieza a considerar el efecto que ocasiona el ingreso de nuevos vehículos a la calle transitada sobre el tiempo de recorrido de los demás (Thomson, 2001)

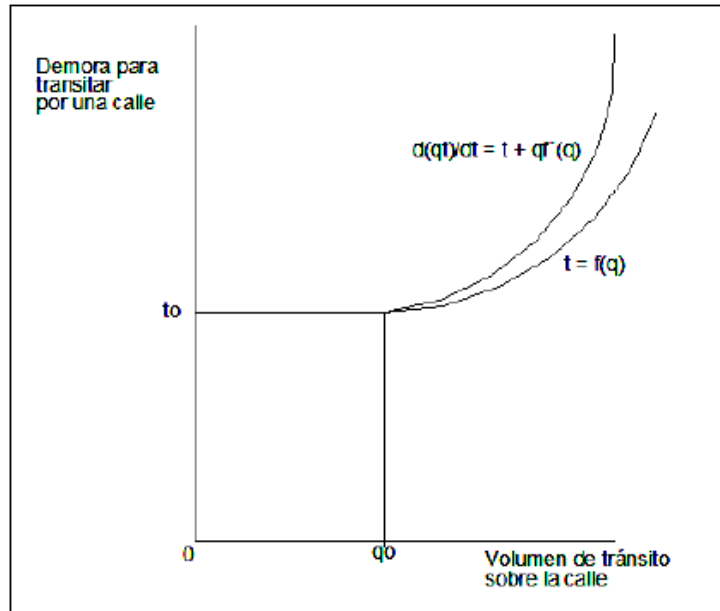


Imagen 3: Representación esquemática del concepto de la congestión de tránsito
Fuente: (Thomson, 2001)

2.2.1. Efectos de la congestión vial.

La congestión vial ya no es algo que simplemente se debe analizar desde el punto de vista de las calle y carreteras. A lo largo de estos últimos años se ha decidido estudiar los efectos que tiene sobre las personas, la economía y el medio ambiente los altos niveles de congestión vial. Estos efectos van en contra vía de lo que inicialmente se deseó cuando se desarrolló esta nueva manera de movilizarnos lo cual fue la mejora en la calidad de vida de todas las personas.

2.2.1.1. Efectos sobre la salud.

Según un artículo publicado por el New York Times (Frakt, 2019), los viajes en auto se están convirtiendo en una actividad poco agradable, y definen la pérdida de tiempo en los “trancos” como un problema de salud pública, ya que en promedio un conductor o pasajero estadounidense pierde cerca de 42 horas al año en esta congestión, pero en ciudades como Los Ángeles, pueden llegar a perder hasta 72 horas al año. Esto está siendo un problema ya que las personas están bajando los niveles de bienestar psicológico hasta tal punto que se preocupan más por el tráfico que pueden encontrar a la hora de viajar que por la misma seguridad personal. Así mismo, se encontró que las personas están más dispuestas a ceder hasta cinco minutos de otras actividades con tal de poder ahorrarse hasta un minuto en carretera.

Esto no solo afecta a las personas que están dentro de la congestión sino también a los de su entorno, ya que dentro de estas aglomeraciones vehiculares se desarrollan conductas agresivas. Entre el 2011 y el 2015 en algunas ciudades de Estados Unidos, se encontró que el incremento en el tiempo medio dentro del tráfico conllevó a un aumento del 9% en los índices de violencia doméstica en horas de la noche, según indica el mismo medio.

2.2.1.2. Efectos sobre la economía.

En el mismo artículo (Frakt, 2019), se mencionan los incrementos en los costos anuales en combustibles por parte de los ciudadanos, ya que en el año 2018 esta cifra llegó a los \$100.000 millones de dólares en consumo extra. De este mismo modo, las pérdidas de tiempo en estos escenarios han provocado que las personas sean menos productivas en sus trabajos: En Bogotá, para el año 2018, una persona perdía 272 horas al año, y según la revista Portafolio (Portafolio, 2019), aquellos que llegaban a trabajar después de pasar un largo tiempo parado en el tráfico eran menos felices y menos productivos.

Durante la pandemia del 2019 muchos sectores se trasladaron a la virtualidad, reduciendo a cero el tiempo gastado en transporte, teniendo más posibilidades de aprovechar mejor el tiempo, y fue allí donde se demostró que muchos de esos trabajos que se pueden hacer desde las casas se hacían mejor y por personas más productivas.

2.2.1.3. Efectos sobre el medio ambiente.

Los efectos sobre el medio ambiente que tiene los altos niveles de tráfico vehicular son preocupantes. Según un estudio de la Universidad de Surrey y citado por el medio “Catorce6” (Catorce6, 2016), dice que un vehículo atascado en una vía con un flujo restringido genera un 40% más de contaminación que uno con las mismas características, esto debe a la combinación de acelerar y frenar varias veces en intervalos cortos de distancia, sumado a esto, en lugares con temperaturas más cálidas, esta exposición alta a la contaminación genera una sensación térmica superior a la real, haciendo necesario el uso del aire acondicionado del vehículo e imposibilitando el bajar los vidrios de las ventanas ya que el CO2 generado no tiene el tiempo suficiente para disolverse en el aire, generando así un riesgo para los ocupantes del auto.

2.3. Sistemas de control de tráfico.

Actualmente se cuentan con distintos sistemas de control de tráfico, estos se dividen en dos categorías, en la primera están todas aquellas señales verticales, que en tránsito son aquellas señales que están dispuestas en postes a un lado de la vía. Específicamente hablando de control de tráfico, se tienen a los semáforos, los “Pare” y “Ceda el paso”. La segunda categoría está conformada por las señales horizontales, y son aquellas que están pintadas sobre el suelo o pavimento, entre ellas encontramos también “Pare”, cebras, “Zonas escolares”.

Hay que decir también que cuando el tráfico es bastante denso, no todas las señales funcionan y es ahí cuando intervienen personas como agentes de tránsito o agentes de movilidad para agilizar y tratar de reducir la congestión que se está generando.

2.4. Intersecciones viales.

Según el INVIAS, una intersección vial es un “área general donde dos o más vías se unen o cruzan, ya sea a nivel o desnivel o que comprende toda la superficie necesaria para facilitar todos los movimientos de los vehículos que se cruzan por ellos” (INVIAS, 2018). Estas intersecciones son de suma importancia dentro de los sistemas viales, especialmente para los de una ciudad ya que son la conexión directa de calles o caminos a vías

principales, o la conexión de vías principales entre sí. Todas las intersecciones tienen puntos clave que ayudan a entender el funcionamiento de la misma.

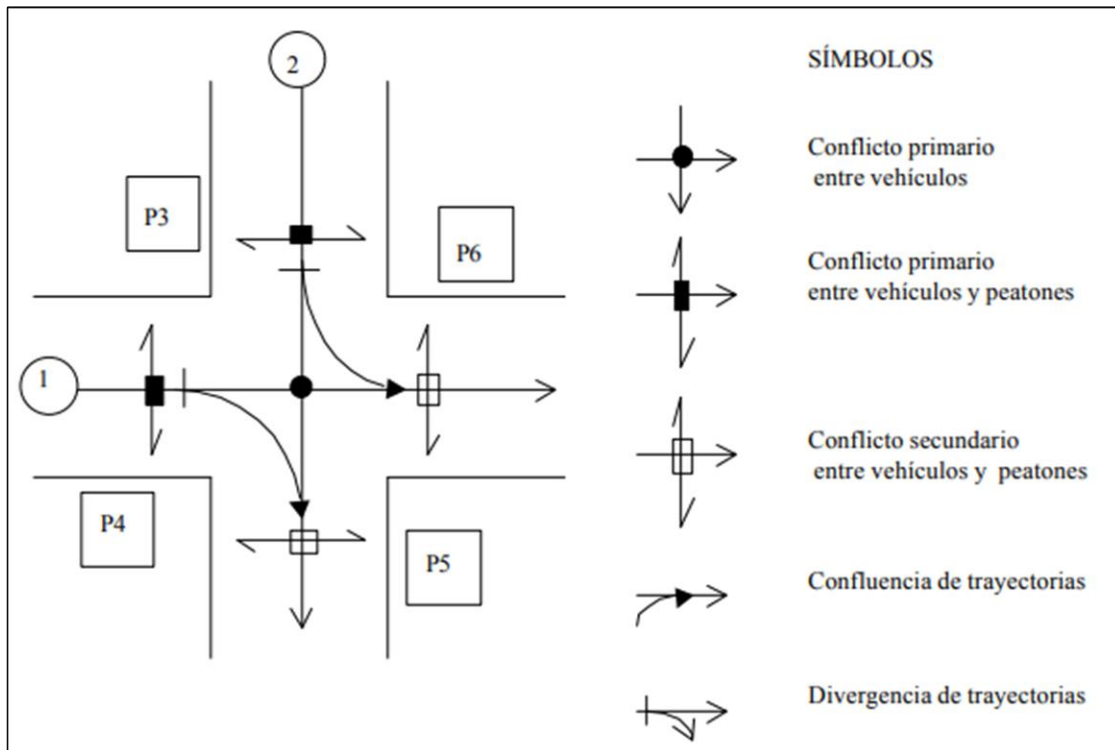


Imagen 4: Puntos de conflicto en una intersección vial.
Fuente: (Diaz Ivorra & Diaz Ivorra, 2002)

En la imagen 4 se muestran todos los puntos de conflicto que se pueden presentar dentro de una intersección tradicional donde:

- **Conflicto primario entre vehículos:** Es el punto en el que se pueden encontrar o cruzar vehículos cuyos orígenes son distintos y es de cuidado este tipo de conflicto ya que puede ser un sector de alta accidentalidad en malas configuraciones.
- **Conflicto primario entre vehículos y peatones:** Es donde se cruzan los vehículos desde un origen con los peatones que se encuentran antes de la intersección. En este sector, por lo general, se encuentra un semáforo peatonal y uno vehicular.
- **Conflicto secundario entre vehículos y peatones:** Es donde se cruzan los vehículos en su ruta a al final de la intersección con los peatones que se encuentran después de la misma.
- **Confluencia de trayectoria:** Es el punto donde se encuentran los vehículos que tienen orígenes distintos, pero coinciden con sus destinos, dependiendo del origen y destino, la configuración semafórica puede variar.
- **Divergencia de trayectorias:** Es el punto donde vehículos que provienen de un mismo origen se separan para llegar a un destino diferente.

2.4.1. Tipos de intersección vial.

De acuerdo a la definición de intersección vial, se tiene que las intersecciones se dividen en dos grandes grupos, los cuales son intersección a nivel e intersección a desnivel. Dentro de estas dos categorías también existe una subdivisión que se explica a continuación.

2.4.1.1. Intersección a nivel.

Este tipo de intersección es muy común en las vías, ya que no requiere la construcción de ningún tipo de puente o túnel. Así como lo explica Rentingfinders en su página web (Renting Finders, 2022), en este tipo de intersecciones se pueden realizar acciones como ir en dirección recta, girar a la derecha, girar a la izquierda o realizar un giro en U, es muy importante mencionar que estos giros van sujetos a la naturaleza y reglas de la intersección ya que en algunos casos no aplican o simplemente no son permitidos.

Así mismo, los sistemas que pueden controlar el tráfico son señales de tránsito horizontales como lo son los semáforos, STOP, ceda el paso o señales verticales como cebras o paso peatonal. Dentro de las intersecciones a nivel podemos encontrar:

2.4.1.1.1. Intersección a nivel sin canalizar y canalizada.

En la imagen 5 se muestra 2 figuras, la primera de izquierda a derecha es una intersección vial sin canalizar, en este ejemplo no hay manera de evitar los puntos de conflicto, los cruces y todas las interacciones se dan dentro de la intersección, este ejemplo es muy común en vías con poco espacio y con flujo de vehículos bajo o moderado.

Por otra parte, la segunda figura es una intersección canalizada, en este caso lo que se busca es tratar de reducir esos puntos de conflicto, por lo general se usan en lugares que cuenten con el espacio suficiente para agregar el área extra y a su vez que cuenten con flujos altos.

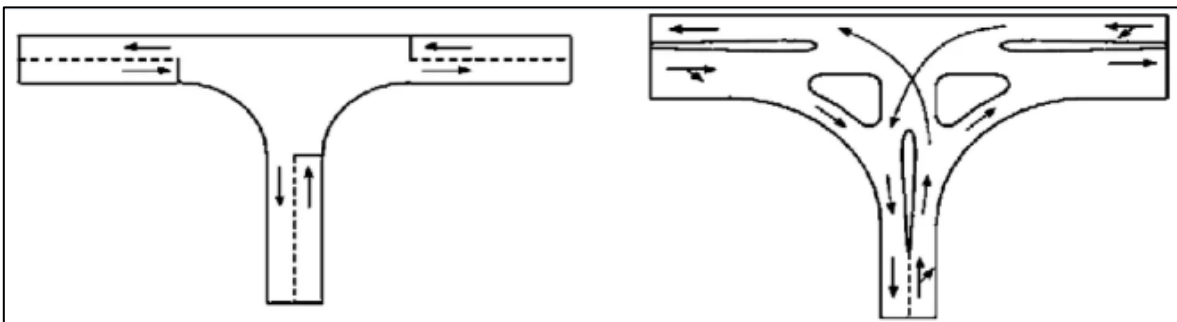


Imagen 5: Intersección vial a nivel sin canalizar y canalizada.

Fuente: (Ramos Cuito, 2019)

2.4.1.1.2. Intersecciones a nivel de aceleración y desaceleración.

En la imagen 6 se muestran dos figuras, la primera de arriba hacia abajo muestra una intersección con carriles de aceleración, este tipo de intersección, en su mayoría no requiere de semáforos, solo se requiere una señal de STOP o ceda el paso, es de

aceleración porque el auto que entra a la intersección debe aumentar la velocidad y con precaución ingresar a la vía principal. Estas son muy comunes en autopistas.

Por otro lado, en la segunda figura de arriba hacia abajo, se tiene una intersección con carriles de desaceleración, cuya función es la de servir como vía de evacuación de vehículos que desean tomar otra vía u otra dirección, también funcionan como retornos.

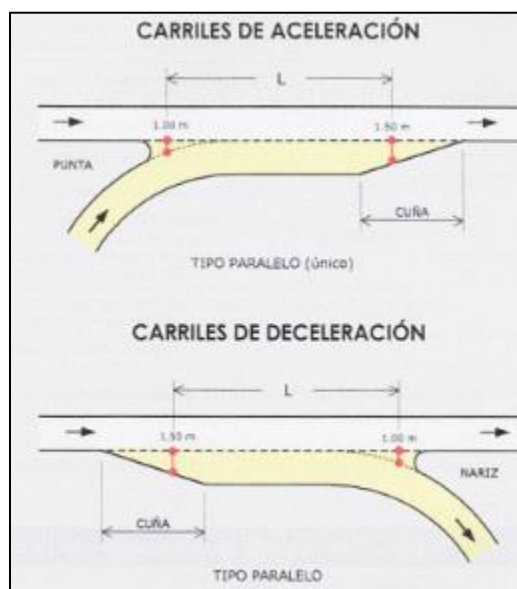


Imagen 5: Intersección vial a nivel de carriles de aceleración y desaceleración.
Fuente: (Toyocosta, 2021)

2.4.1.1.3. Glorieta convencional.

En la imagen 6 se muestra una glorieta convencional, cuya función es que conecte al menos 3 vías lo que representa al menos 6 flujos distintos, todo esto alrededor de una isla o plaza central. No es muy común que lleve semáforos, pero en vías con flujos altos se recomienda que se usen.



Imagen 6: Glorieta convencional
Fuente: (Ossorio, 2020)

2.4.2. Sistemas semafóricos.

Como bien lo define la secretaría de movilidad de Medellín, Colombia, “Los semáforos son dispositivos de señalización mediante los cuales se regula la circulación de vehículos, bicicletas y peatones en vías, asignando el derecho de paso o prelación de vehículos y peatones secuencialmente, por las indicaciones de luces de color rojo, amarillo y verde, operadas por una unidad electrónica de control.” (Secretaria de movilidad de Medellín, 2020)



*Imagen 7: Tipos de semáforos
Fuente: Google images*

En la imagen 7, se muestran los distintos tipos de semáforos que se tienen. El primero de izquierda a derecha es un semáforo vehicular el cual, en su mayoría, funciona en tres tiempos (Rojo, Amarillo, Verde), cada uno de los colores con su respectivo significado y combinación de tiempos dentro del ciclo semafórico. El segundo de en el mismo orden, es un semáforo peatonal, por lo general se encuentran al inicio y final de la cebrada o del paso peatonal, este semáforo tiene un ciclo inverso al semáforo vehicular que se encuentra en la misma calle. En tercer lugar, se encuentra un semáforo para ciclistas y se encuentran en las ciclovías designadas y cuentan con un ciclo igual al del semáforo peatonal. Por último, está el semáforo para pasos férreos, en el orden de prelación este siempre tendrá la prioridad, es por eso que siempre que pase un tren, este semáforo se activará y detendrá el flujo vehicular.

2.4.2.1. Ciclo semafórico.

El ciclo semafórico es el tiempo que transcurre entre sus fases hasta justo antes de que se empiecen a repetir, la imagen 8 muestra un ejemplo de ciclo semafórico el cual se compone de tres fases, en este caso en particular cada fase tarda lo mismo (95 segundos), lo que haría un tiempo de ciclo de 285 segundos. No es necesario que las fases duren lo mismo, los tiempos se adecúan de acuerdo a las necesidades de la intersección.

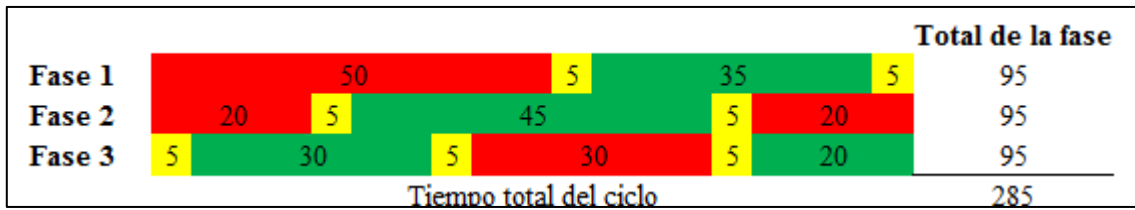


Imagen 8: Ciclo semafórico
Fuente: Autor

Para el caso de Bogotá, los tiempos se determinan de acuerdo a la longitud de la vía, la capacidad de la misma y los posibles flujos. Con estos datos, se determina el tiempo en el cual se estima que la vía se llena y se evacúa. Todos los tiempos son los mismos a lo largo del día y todos los días, muy rara vez se cambian, y se hacen cuando los flujos presentan un incremento sostenido a lo largo del día. En los últimos 5 años se intentado instalar semáforos inteligentes, los cuales cuentan con ciclos dinámicos, es decir, varían los tiempos de acuerdo a la hora del día o al flujo que en ese momento se presente en la intersección. (Secretaría de Movilidad de Bogotá, 2020)

2.5. Modelos de comportamiento vehicular.

En la literatura se pueden encontrar una cantidad importante de trabajos enfocados a este tipo de modelos, cada uno con sus propias características, enfoques y peculiaridades como lo es en el caso de (Camacho & Medina, Simulación del tráfico de autos en una intersección: desde la perspectiva de una plataforma multiagente, 2012), allí se puede observar que realizan un modelo para una intersección en particular, en este caso se evalúa la relación entre el comportamiento y actitud en la vía por parte de los conductores y esto como repercute en el tamaño de las colas y el tiempo de permanencia en el sistema. Así mismo, (Sánchez & Villa, 2012), también analizando una intersección tradicional, busca por medio de modificaciones en los tiempos del ciclo semafórico, reducir la cantidad de vehículos no evacuados.

También se pueden encontrar trabajos relacionados al tema con variantes como es el caso de modelo de simulación discreta exclusivos para peatones con el fin de reducir los tiempos de espera y aumentar el nivel de servicio con criterios como espacio ocupado por peatón, entre otros. (Schmid, 2016)

Por último, se tienen modelos que combinan los dos factores (Autos y peatones) (Hoyos, 2010) en su artículo desarrolla un proyecto con estas características donde programa y analiza las interacciones que hay entre los dos actores en una intersección en particular.

Hay que resaltar que e la mayoría de los casos quienes proponen un modelo, lo hacen sobre una vía en particular o simplemente indican los pasos para hacer un modelo que se ajuste a los comportamientos de los autos o peatones, pero en ningún caso se hace un modelo que generalice la situación y que, de pautas para la aplicación de un caso en particular, esto se debe en gran parte a que todas las situaciones son distintas.

3. Metodología.

Luego de realizar una lectura y análisis cuidadoso a algunos trabajos académicos que giran entorno al mismo problema, se encontró que lo que sugieren ellos inicialmente es generar una matriz OD (Origen-Destino) de cada una de las calles que hacen parte de la intersección, esta matriz nos ayuda a identificar los comportamientos que tienen los conductores y las decisiones que toman al conducir, es decir, la dirección de la cual provienen y la que se dirigen (Camacho, Medina, & Terán, Simulación del tráfico de autos en una intersección: desde la perspectiva de una plataforma multiagente., 2012)

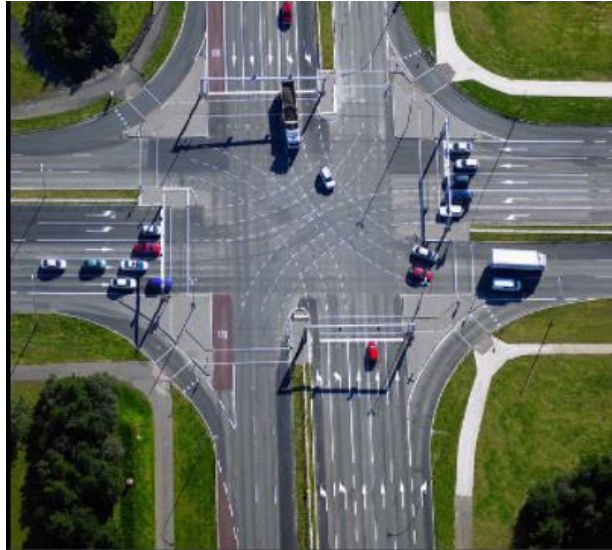


Imagen 9: Decisiones dentro de una intersección vial compleja
Fuente: Google Images

Esta matriz puede extenderse y generar distintas variantes como uno quiera, ya que como sabemos, el comportamiento en las vías no es siempre el correcto, es decir, hay muchos conductores que cometen distintas imprudencias al realizar cruces indebidos, pasarse semáforos en rojo o simplemente detenerse en plena vía generando así congestiones. En nuestro caso, y debido a las condiciones físicas de la vía, no es posible que existan

Este análisis es importante porque es el punto de partida para el siguiente paso dentro del proceso de desarrollo del modelo, el cual es la revisión de los tiempos de espera de los vehículos dentro de la cola y así poder realizar una comparación de acuerdo a la densidad de vehículos real vs la ideal. Para el cálculo de esta densidad se tiene que, según el manual HCM:

$$\text{Densidad} \left(\frac{\text{Veh}}{\text{Km}} \right) = \frac{v \left(\frac{\text{Veh}}{\text{hr}} \right)}{S \left(\frac{\text{Km}}{\text{hr}} \right)} \quad (1)$$

Donde: v es el flujo de vehículos que pasan por esa vía y S es la velocidad promedio de esos vehículos. Hay que aclarar que entre menor sea la densidad de vehículos en la vía, ésta estará menos congestionada, es por eso que rutas de mucho flujo vehicular y poca velocidad andan por lo general saturadas.

Luego de tener la información mínima requerida, se procede a realizar el modelo de simulación, para este trabajo en particular, se usará una simulación multiagente, donde el centro de atención son los vehículos que cruzan por las vías de la intersección seleccionada, son estos los agentes ya que están en la capacidad de tomar decisiones y son quienes dan forma al modelo que se va a analizar.

El software a utilizar es AnyLogic, el cual es una herramienta bastante práctica y útil para la simulación y optimización de eventos. En nuestro caso, se hará una simulación de la situación actual y se comparará con los resultados obtenidos bajo un proceso de observación en campo, luego de esto se calibrará en caso de existir algún desfase o error en el modelo. Finalmente, se procederá a proponer un nuevo modelo que mejore la situación actual o que al menos reduzca los tiempos de espera de los vehículos dentro de la intersección analizada.

Dentro del análisis de escenarios, se espera que al variar alguno de los factores controlables (Tiempos del ciclo semafórico), se pueda observar el efecto que tiene el tiempo de cada una de las luces que indican el continuar el camino o detenerse para dar paso, sobre la congestión que se da dentro de la vía y como esto afecta a la densidad vehicular en esta zona.

Así mismo, para este trabajo se seguirán las pautas para aplicar la simulación de tráfico al análisis de nivel de servicio (Johan Olstama, 2011), donde se habla del modo correcto y el paso a paso para hacer un análisis adecuado y acorde a la situación. Sumado a esto y como se mencionó anteriormente, se usará el Software AnyLogic versión académica.

3.1. Definición del problema.

En una ciudad como Bogotá donde habitan cerca de 7'100.000 personas (DANE,2018), la movilidad es una necesidad básica. Actualmente la capacidad de los medios de transporte público no es suficiente para la demanda, sumado a eso, el plan de ordenamiento de la ciudad está dado para que las personas vivan en las periferias y la mayoría de trabajos se concentren en el centro lo que provoca largos desplazamientos entre los hogares y los lugares de trabajo. Es por esto que muchas personas se han venido desplazando del transporte público al transporte particular, generando así un aumento muy alto en los vehículos circulantes en la ciudad.

Con el paso del tiempo la situación se agudiza más y es por eso que se han tomado medidas como la del pico y placa, que en momentos no es muy claro su objetivo, si es el de reducir emisiones de CO₂ o el de reducir la cantidad de vehículos en las calles. El problema está en que por más medidas que se propongan que restringen la movilidad de las personas en sus vehículos, la congestión sigue siendo muy preocupante y los tiempos de transporte bastante altos.

Las soluciones para este tipo de problemas se pueden ver desde el punto de vista estructural que está enfocado en la capacidad y disposición de las vías, es decir, la cantidad de carriles que lleva, los sentidos que maneja, las velocidades máximas, entre otros. Solucionarlo por este medio resulta a veces costoso porque por lo general va requerir la construcción o modificación de las vías, un ejemplo claro es cuando en una intersección para uno de los sentidos construyen un puente o un túnel, es decir, se puede pasar de una

intersección a nivel a una intersección a desnivel. Por lo general esto pasa cuando el flujo es muy alto y constante a lo largo del día, en este caso no es conveniente detenerlo solo con un semáforo.

Por otro lado, se tienen soluciones desde el punto de vista, en su artículo (D'Ambrogio & Iazeolla, 2009), el autor explica que es en estas situaciones donde la congestión se puede corregir desde el control de tráfico hasta la mejora en la sincronización en los semáforos. Es esta segunda opción la que consideramos adecuada y es la guía a lo largo de este trabajo.

3.2. Modelo de simulación en AnyLogic.

Como se ve en la imagen 10, se modeló una intersección a nivel y sin canalizar, la cual cuenta con vías de dos carriles en el mismo sentido y en contraflujo. La intersección modelada tiene una longitud aproximada de 150 metros a escala desde el inicio de alguna vía hasta el punto inmediatamente anterior a la entrada de la intersección. Se cuentan con cuatro puntos de ingreso y cuatro puntos de evacuación de vehículos cuya denominación para este caso es la siguiente para los orígenes empezando por el número 1 y finalizando con el número 4: OSur, OOeste, ONorte, OEste, por su parte los puntos de destino en el mismo orden se denominan SSur, SOeste, SNorte y SEste.

Se evaluaron los escenarios pertinentes de acuerdo a diferentes situaciones, para esto todos los movimientos de vehículos están permitidos (giros a la derecha, giros a la izquierda y camino recto) excepto el giro en U, ya que en este tipo de intersecciones es una maniobra peligrosa y no se adecúa al ciclo semafórico escogido.

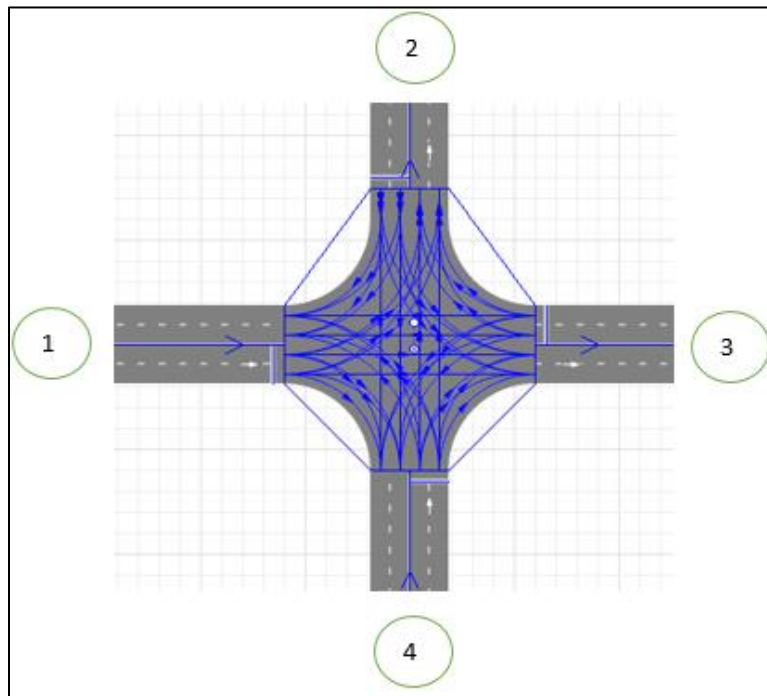


Imagen 10: Modelo en AnyLogic
Fuente: Autor

3.2.1. Información de entrada.

La información de entrada necesaria para cada uno de los escenarios evaluados es la siguiente:

Frec_OEste= Flujo vehicular de origen Este (Veh/min)
Frec_OOeste= Flujo vehicular de origen Oeste (Veh/min)
Frec_ONorte= Flujo vehicular de origen Norte (Veh/min)
Frec_OSur= Flujo vehicular de origen Sur (Veh/min)
VelP_OEste= Velocidad promedio de los autos de origen Este (Km/h)
VelP_OOeste= Velocidad promedio de los autos de origen Oeste (Km/h)
VelP_ONorte= Velocidad promedio de los autos de origen Norte (Km/h)
VelP_OSur= Velocidad promedio de los autos de origen Sur (Km/h)
AcelP_OEste= Aceleración promedio de los autos de origen Este (m/s²)
AcelP_OOeste= Aceleración promedio de los autos de origen oeste (m/s²)
AcelP_ONorte= Aceleración promedio de los autos de origen Norte (m/s²)
AcelP_OSur= Aceleración promedio de los autos de origen Sur (m/s²)
Prob_EO= Probabilidad de que los autos de origen Este se dirijan al Oeste
Prob_EN= Probabilidad de que los autos de origen Este se dirijan al Norte
Prob_ES= Probabilidad de que los autos de origen Este se dirijan al Sur
Prob_OE= Probabilidad de que los autos de origen Oeste se dirijan al Este
Prob_ON= Probabilidad de que los autos de origen Oeste se dirijan al Norte
Prob_OS= Probabilidad de que los autos de origen Oeste se dirijan al Sur
Prob_NE= Probabilidad de que los autos de origen Norte se dirijan al Este
Prob_NO= Probabilidad de que los autos de origen Norte se dirijan al Oeste
Prob_NS= Probabilidad de que los autos de origen Norte se dirijan al Sur
Prob_SE= Probabilidad de que los autos de origen Sur se dirijan al Este
Prob_SO= Probabilidad de que los autos de origen Sur se dirijan al Oeste
Prob_SN= Probabilidad de que los autos de origen Sur se dirijan al Norte

Así mismo, se tienen algunos parámetros que permanecen constantes en todos los escenarios, estos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros constantes

Parámetro	Valor
Longitud del vehículo	4 metros
Máxima desaceleración	4.2 metros/segundos ²
Número de carriles por sentido	2
Ancho de carril	3.5 metros

Fuente: Autor

3.2.2. Información de salida.

La información de interés en cada uno de los escenarios será siempre la misma, el tiempo medio de permanencia en el sistema de los vehículos, así como los tiempos de cada una de las fases dentro del ciclo semafórico.

3.2.3. Ciclo semafórico a utilizar.

En la imagen 11 se muestra el ciclo semafórico con sus respectivas fases a utilizar, el sistema a modelar cuenta con 4 semáforos, uno dispuesto en cada una de las esquinas de la calle. La “stopLine” hace referencia al semáforo ubicado en la calle cuyo origen se denominó anteriormente como “OEste”. La “stopLine1” es el semáforo ubicado en la calle denominada “OSur”, de este mismo modo la “stopLine2” es la que está ubicada en la calle denominada “OOeste” y por último la “stopLine3” es la que está ubicada en la calle denominada “ONorte”.

Como se describe en la literatura existente, para este tipo de modelos se tiene que el tiempo en verde de uno de los semáforos es equivalente al mismo tiempo en verde del sentido contrario de la calle, es decir que, si el semáforo que controla el flujo de origen norte tiene un tiempo de 40 segundos, el semáforo que controla el flujo de origen sur debe tener el mismo tiempo. Así mismo, el semáforo que está ubicado a la derecha debe tener la fase inversa del semáforo, pero con el mismo tiempo, es decir que el semáforo que controla el flujo de origen oeste debe tener al mismo tiempo una fase en rojo de 40 segundos para este caso.

En casi todos los países de Latinoamérica se usa una fase amarilla que de acuerdo al color predecesor se puede interpretar de una forma u otra. En este caso para Bogotá, se tiene que, de manera cultural, cuando un semáforo está en rojo y pasa a amarillo, los vehículos aún están detenidos, lo que sería este amarillo una extensión del tiempo en fase roja. Por otra parte, cuando el semáforo está en verde y pasa a amarillo, se toma como una advertencia de reducción de velocidad, pero se asume que aún se puede pasar, por lo que el amarillo, en este caso, se asume que es una extensión de la fase verde.

The screenshot shows a configuration window for a traffic light. The name is "trafficLight". It is set to "Intersection's stop lines" mode. The intersection is "intersection". The phases are defined as follows:

Phases:	Durations (sec):	VerdEO1	5	VerdNS1	5
Stop lines:					
stopLine		Green	Red	Red	Red
stopLine1		Red	Red	Green	Red
stopLine2		Green	Red	Red	Red
stopLine3		Red	Red	Green	Red

Imagen 11: Ciclo semafórico

Fuente: Autor

3.2.4. Escenarios evaluados.

Para realizar un modelo que generalice una intersección a nivel sin canalizar, se tuvo en cuenta 5 posibles escenarios que cumplen con características como la de respetar el ciclo semafórico con sus respectivas fases ya que, si no pasa esto, el modelo corre el riesgo de ser impreciso y a la larga puede llegar a ser perjudicial para los conductores, provocando así tiempos más altos de permanencia en el sistema.

3.2.4.1. Escenario 1.

Como se muestra en la imagen 12, las líneas azules muestran cuales son los giros permitidos para este caso. En este escenario se crearon situaciones hipotéticas que servirán como insumo para la elaboración de un modelo de regresión que tendrá como objetivo el cálculo de la combinación adecuada de los tiempos de cada fase con el fin de reducir los tiempos promedio de espera dentro de esa intersección.

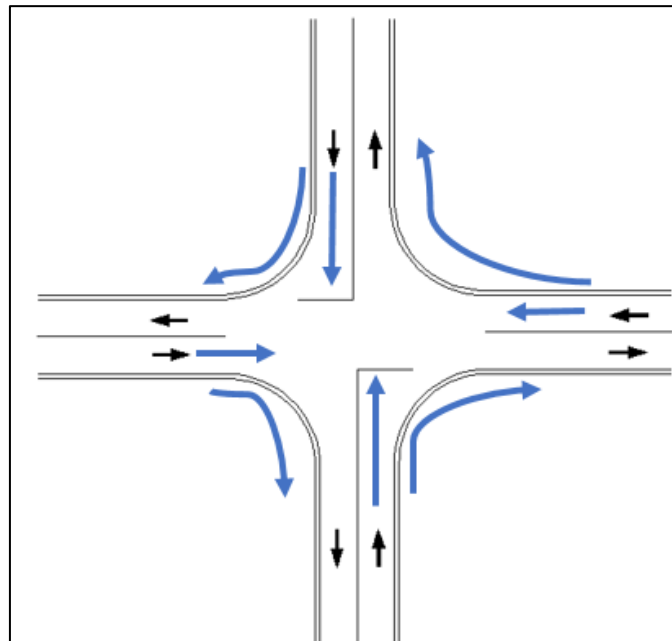


Imagen 12: Giros permitidos en escenario 1

Fuente: Autor

En la tabla 2 se muestra un ejemplo de una de las muestras usadas dentro de la base de datos, estos datos se ingresaron en AnyLogic para determinar el tiempo adecuado de cada una de las fases del ciclo semafórico. Para esto se usó el módulo de optimización del software el cual iteró cerca de 300 veces cambiando las combinaciones y recalculando los tiempos medios de espera en el sistema.

Para poder tener una medida estadísticamente real, se realizaron 200 réplicas para determinar si el tiempo que daba como resultado era confiable. Para este caso en particular se obtuvo un tiempo promedio de luz en verde para la “stopLine” de 81 segundos con una desviación estándar de 1,12, mientras que para la “stopLine1” se obtuvo un tiempo de 20 segundos. Al final en promedio según el modelo de simulación se puede llegar a tener un tiempo medio de espera en cola de 134,891 segundos.

Tabla 2: Parámetros escenario 1

Frec_OEste=16	Frec_OOeste=10	Frec_ONorte=22	Frec_OSur=30	VelP_OEste=28	VelP_OOeste=17
VelP_ONorte=19	VelP_OSur=12	AcelP_OEste=1,4	AcelP_OOeste=1,6	AcelP_ONorte=0,9	AcelP_OSur=1,2
Prob_EO=0,4	Prob_EN=0,6	Prob_ES=0	Prob_OE=0,1	Prob_ON=0	Prob_OS=0,9
Prob_NE=0	Prob_NO=0,9	Prob_NS=0,1	Prob_SE=0	Prob_SO=0,1	Prob_SN=0,9

Fuente: Autor

Para este escenario como para los que vienen se realizó el mismo proceso, así mismo, se creó una base de datos con cerca de 60 situaciones con estas mismas características, solo se variaron los parámetros de tal manera que se pudiera obtener unos datos extensos y a la vez diversos entre sí, para más adelante poder alimentar el modelo de regresión.

3.2.4.2. Escenario 2.

Como se observa en la imagen 13, contamos con la misma intersección, la única diferencia es que el flujo y las probabilidades de origen Oeste se reducen a 0, quiere decir que no hay vehículos provenientes de ahí. Hay intersecciones que se comportan de este modo ya que puede que el diseño de la vía esté dado para reducir la congestión de otras vías o dar acceso a otras calles y avenidas.

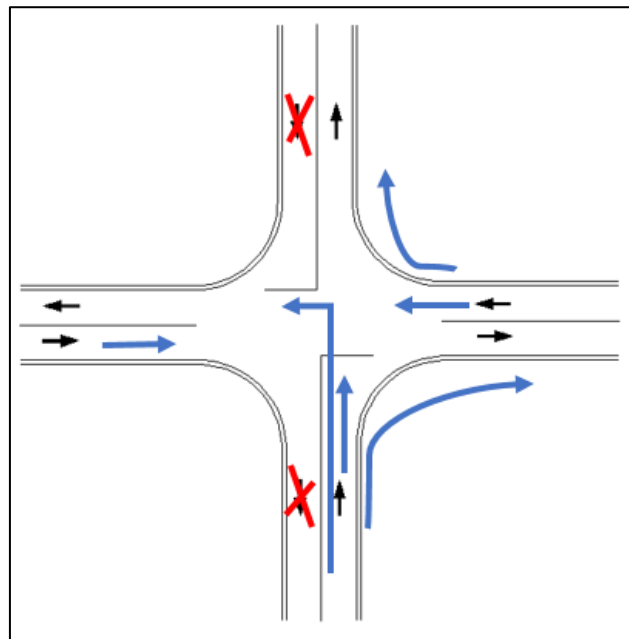


Imagen 12: Giros permitidos en escenario 2

Fuente: Autor

En la tabla 3 se muestra un ejemplo de este escenario, al igual que en el escenario 1 se hizo una base de datos amplia y diversa y cada situación en este escenario tiene la misma cantidad de réplicas que garantizan que al menos el 95% de las veces se llegue al valor promedio obtenido. En este caso se obtuvo un tiempo promedio de luz en verde para la “stopLine” de 24 segundos, mientras que para la “stopLine1” se obtuvo un tiempo de 61 segundos. Al final, según el modelo de simulación, se puede llegar a tener un tiempo medio de espera en cola de 92,888 segundos.

Tabla 3: Parámetros escenario 2

Frec_OEste=5	Frec_OOeste=0	Frec_ONorte=29	Frec_OSur=3	VelP_OEste=22	VelP_OOeste=0
VelP_ONorte=17	VelP_OSur=19	AcelP_OEste=1,5	AcelP_OOeste=0	AcelP_ONorte=1,3	AcelP_OSur=1,9
Prob_EO=0,9	Prob_EN=0,1	Prob_ES=0	Prob_OE=0	Prob_ON=0	Prob_OS=0
Prob_NE=0	Prob_NO=0,6	Prob_NS=0,4	Prob_SE=0	Prob_SO=0	Prob_SN=1

Fuente: Autor

3.2.4.3. Escenario 3.

En la imagen 13 se muestra otra variante de la intersección inicial, en este caso se restringe el flujo de OEste y sería una situación muy similar al escenario 2.

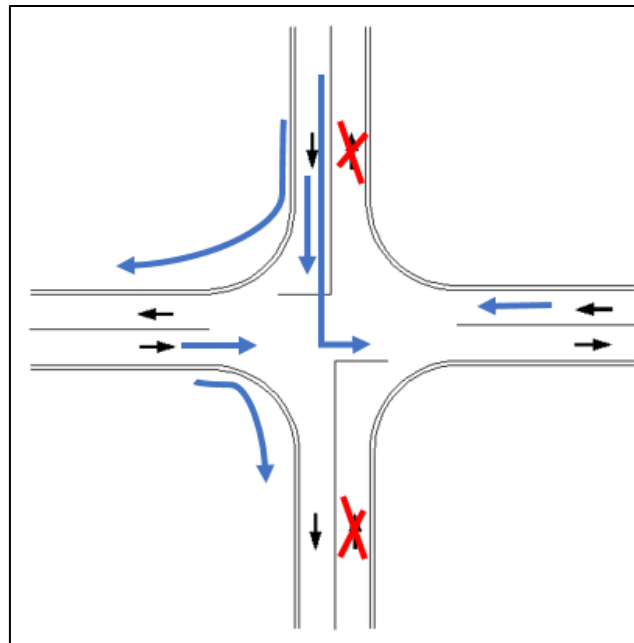


Imagen 13: Giros permitidos en escenario 3

Fuente: Autor

En la tabla 4 se muestra un ejemplo de los datos usados para este escenario. En este caso se obtuvo un tiempo promedio de luz en verde para la “stopLine” de 45 segundos, mientras que para la “stopLine1” se obtuvo un tiempo de 35 segundos. Al final, según el modelo de simulación, se puede llegar a tener un tiempo medio de espera en cola de 86,956 segundos.

Tabla 4: Parámetros escenario 3

Frec_OEste=0	Frec_OOeste=20	Frec_ONorte=9	Frec_OSur=5	VelP_OEste=0	VelP_OOeste=23
VelP_ONorte=18	VelP_OSur=21	AcelP_OEste=0	AcelP_OOeste=2	AcelP_ONorte=0,8	AcelP_OSur=1,4
Prob_EO=0	Prob_EN=0	Prob_ES=0	Prob_OE=0,5	Prob_ON=0	Prob_OS=0,5
Prob_NE=0	Prob_NO=0	Prob_NS=1	Prob_SE=0,4	Prob_SO=0	Prob_SN=0,6

Fuente: Autor

3.2.4.4. Escenario 4.

De la misma manera que la anterior, esta es una variante de la situación inicial, en este caso se restringe el flujo OSur.

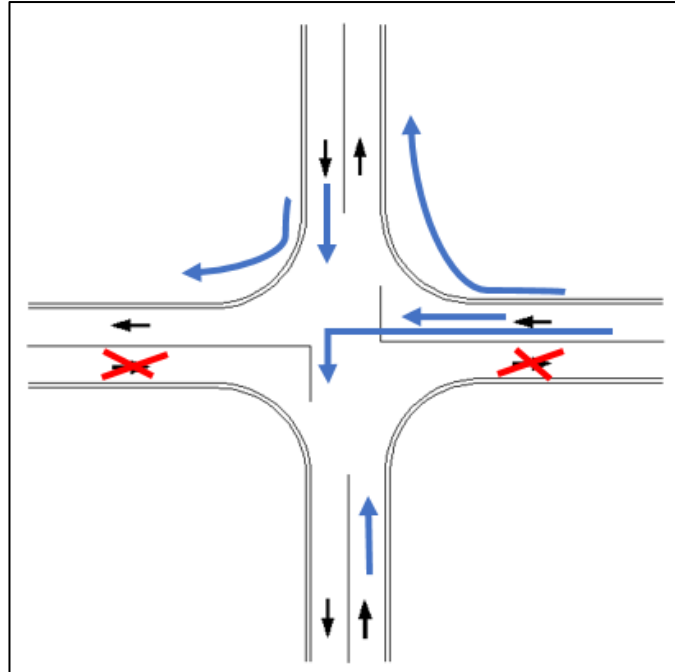


Imagen 14: Giros permitidos en escenario 4
Fuente: Autor

Dados los datos en la tabla 5, se obtuvo un tiempo promedio de luz en verde para la “stopLine” de 81 segundos, mientras que para la “stopLine1” se obtuvo un tiempo de 28 segundos. Al final, según el modelo de simulación, se puede llegar a tener un tiempo medio de espera en cola de 102,921 segundos.

Tabla 5: Parámetros escenario 4

Frec_OEste=5	Frec_OOeste=25	Frec_ONorte=30	Frec_OSur=0	VelP_OEste=19	VelP_OOeste=30
VelP_ONorte=15	VelP_OSur=0	AcelP_OEste=1,8	AcelP_OOeste=1,2	AcelP_ONorte=1,2	AcelP_OSur=0
Prob_EO=1	Prob_EN=0	Prob_ES=0	Prob_OE=0,7	Prob_ON=0	Prob_OS=0,3
Prob_NE=0,1	Prob_NO=0,5	Prob_NS=0,4	Prob_SE=0	Prob_SO=0	Prob_SN=0

Fuente: Autor

3.2.4.5. Escenario 5.

Por último, en la imagen 15 se tiene el último escenario que consiste en eliminar el flujo de ONorte mientras los demás continúan normal.

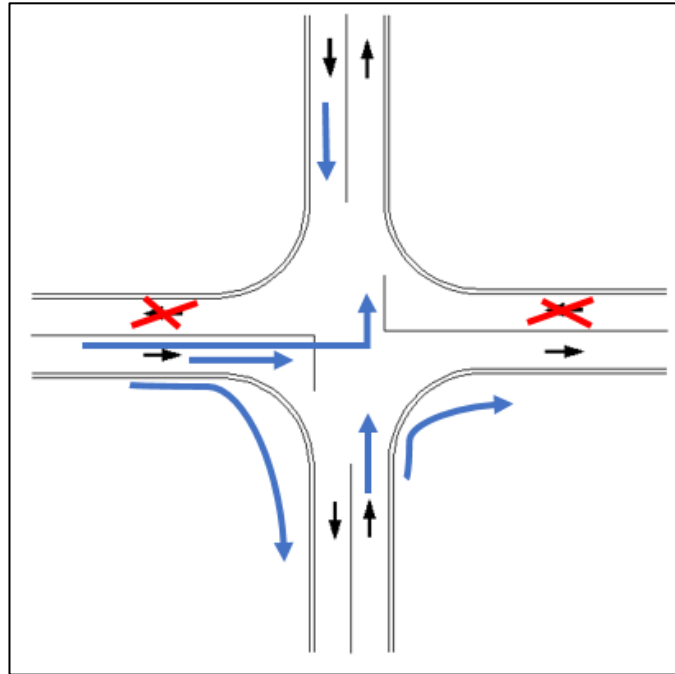


Imagen 15: Giros permitidos en escenario 5
Fuente: Autor

En la tabla 6 se tienen los datos del último escenario analizado, en este se obtuvo un tiempo promedio de luz en verde para la “stopLine” de 84 segundos, mientras que para la “stopLine1” se obtuvo un tiempo de 21 segundos. Al final, según el modelo de simulación, se puede llegar a tener un tiempo medio de espera en cola de 134,488 segundos.

Tabla 6: Parámetros escenario 5

Frec_OEste=27	Frec_OOeste=20	Frec_ONorte=0	Frec_OSur=11	VelP_OEste=13	VelP_OOeste=12
VelP_ONorte=0	VelP_OSur=24	AcelP_OEste=1,7	AcelP_OOeste=1,3	AcelP_ONorte=0	AcelP_OSur=0,9
Prob_EO=0,1	Prob_EN=0,9	Prob_ES=0	Prob_OE=1	Prob_ON=0	Prob_OS=0
Prob_NE=0	Prob_NO=0	Prob_NS=0	Prob_SE=0,6	Prob_SO=0,3	Prob_SN=0,1

Fuente: Autor

3.2.4.6. Toma de datos.

Como se ha mencionado anteriormente, los datos de los escenarios se han obtenido por medio de simulación reiterativa, donde cada caso en particular lleva una cantidad de replicas y a su vez los valores que se obtienen como ideales son óptimos locales y toda esa información es usada para alimentar los modelos de regresión que se usarán en RStudio. Al final se logró concretar una base de datos con cerca de 160 situaciones representadas en los 5 escenarios anteriormente mencionados.

3.3. Modelos de regresión en RStudio.

Los modelos de regresión lineal en machine learning, son modelos de aprendizaje supervisado, el objetivo es poder determinar o predecir los valores de variables a partir de un conjunto de datos llamados predictores, se espera que los datos predictores contengan

información suficiente para su labor (Camejo Corona, Gonzalez, & Morell, 2019). En cada modelo se usa la base de datos creada con AnyLogic y sus 24 variables predictoras que son las mismas descritas en el numeral 3.2.1. sumado a estas variables, se agregan tres más las cuales son los tiempos de la fase en verde de la “stopLine” y “stopLine2” y el tiempo mínimo de permanencia en el sistema de acuerdo al óptimo local procedente de la optimización hecha previamente.

Para este trabajo se probaron 6 modelos de regresión y se usó como medida de desempeño el error medio al cuadrado (MSE). En este caso en particular se usan todos los modelos dos veces, el primero es para estimar el tiempo de la fase en verde de la “stopLine” y el segundo es para estimar el tiempo de la fase en verde de la “stopLine1”.

En cada modelo el conjunto de datos se separó en dos partes, la primera es un subconjunto de entrenamiento donde el modelo aprende, se escala y valida, y el otro subconjunto de prueba que es el que se usa para evaluar la eficiencia del modelo. Por lo general, el subconjunto de entrenamiento es el 80% de todos los datos de la base y el restante se usa para el subconjunto de prueba.

En todos los modelos que se realizaron, se hace una validación cruzada por medio de k-folds, lo cual permite dividir los datos de prueba en k partes donde de manera iterativa se escogen k-1 partes para que hagan de datos de entrenamiento y el otro fold sea datos de prueba. Por lo general se busca que el número de folds o grupos creados no sea mayor a 10 para tener mejores resultados.

3.3.1. Regresión Lasso

Así como le define Ramos en su artículo, Lasso “*es un método que combina un modelo de regresión con un procedimiento de contracción de algunos parámetros hacia cero y selección de variables, imponiendo una restricción o una penalización sobre los coeficientes de regresión*” (Ramos Castillo, 2018)

La regresión Lasso cuenta con modelo el cual tiene en cuenta todas las variables predictoras, es decir no separa ni clasifica los factores que realmente pueden explicar el comportamiento de la variable que se desea predecir, es por eso que cuenta con un modo el cual busca penalizar esas variables que poco aportan al modelo hasta, esta penalización se hace por medio de lambda (λ) el cual entre más grande sea llevará a los coeficientes de las variables a casi cero (0), pero jamás será cero, ya que para que sea así lambda debe tender a infinito. (James, Witten, Hastie, & Tibshirani, 2017)

En este, se hace uso del software R y por medio del paquete “glmnet” se realiza una búsqueda de aquel lambda que minimice el error dentro del modelo. En la imagen 16 se observa como es el comportamiento del “MSE” con relación a la variación del lambda, siento un valor de 2,26 y para que la solución se pueda manejar dentro de un margen de error, se decidió que el lambda esté a una desviación estándar del modelo, lo que lo lleva a tener un valor de 4,34.

Dentro de las características de este modelo es que permite que las variables se puedan estandarizar, esto se usa en gran parte para modelos que cuentan con variables cualitativas, ya que a estas se les asigna un valor numérico para que puedan ser procesadas.

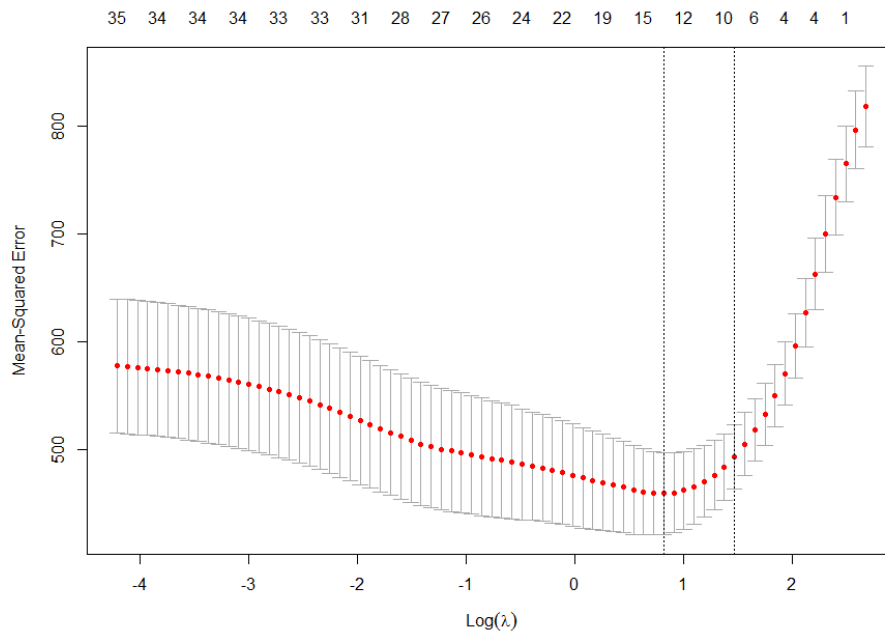


Imagen 16: Error del modelo con respecto al $\log(\lambda)$
Fuente: Autor

3.3.2. Ridge

El modelo anterior (Lasso) es una variante del modelo Ridge, este funciona muy similar al anterior solo que al momento de penalizar las variables si puede llegar a tener coeficientes que sean exactamente cero (0) lo que permite excluir directamente esas variables, mientras que Lasso no lo hace. Una de las desventajas para este modelo es que cuando hay variables muy correlacionadas, Ridge las reduce de manera igualitaria y proporcional, mientras que Lasso solo reduce una de ellas y el peso se lo deja completamente a la otra.

En este caso también se busca el valor óptimo de λ el cual minimice el error y ajuste de mejor manera al modelo en general. Así mismo, se hace una validación cruzada cuyo promedio de errores será el que el modelo nos arroje al final.

3.3.3. PCR

La regresión por componentes principales, es otro método que se usó en este trabajo, este es un método de aprendizaje no supervisado donde lo que hace el modelo es escoger por medio de procesos estadísticos aquellos componentes que expliquen mejor el comportamiento de las variables a predecir. Así mismo este proceso lo que hace es validar que no exista colinealidad entre las variables, después de hecho esto, pasa por un proceso de regularización y después si crea el modelo.

Al regularizar modelos como estos, tenemos que podemos llegar a tener intervalos de confianza entre el 95% y el 99% dependiendo de la situación.

En la imagen 17 se muestra como es el comportamiento del error en función de las componentes que se pueden escoger. Para el modelo en particular que se está elaborando, se tiene que el mejor número de componentes es 6, ya que es con estas con las que el error es el mínimo posible.

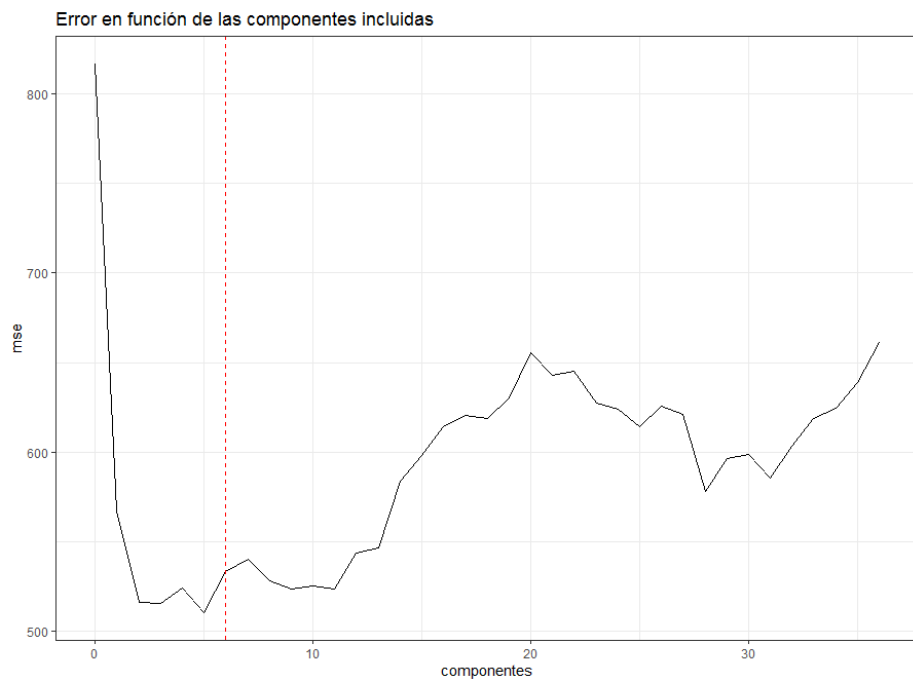


Imagen 17: Error del modelo con respecto al número de componentes
Fuente: Autor

Luego de esto, el modelo se calibra y se ajusta de acuerdo a los datos suministrados, al igual que los casos anteriores, las variables se escalan para poder obtener mejores resultados.

3.3.4. PLS

Al igual que el método anterior, el método de Partial Least Square (PLS), es un método de reducción de dimensiones. PLS es una variación de PCR, en este caso este modelo acepta y tolera de una mejor forma datos que estén muy correlacionados y a la vez que tengan baja varianza. Es por eso que en la imagen 18 se muestra cómo se comporta el error de acuerdo al número de componentes que se tienen en la base de datos. Allí se observa que el número óptimo es 2 ya que en estas dimensiones es donde se explica la mayor varianza de los datos.

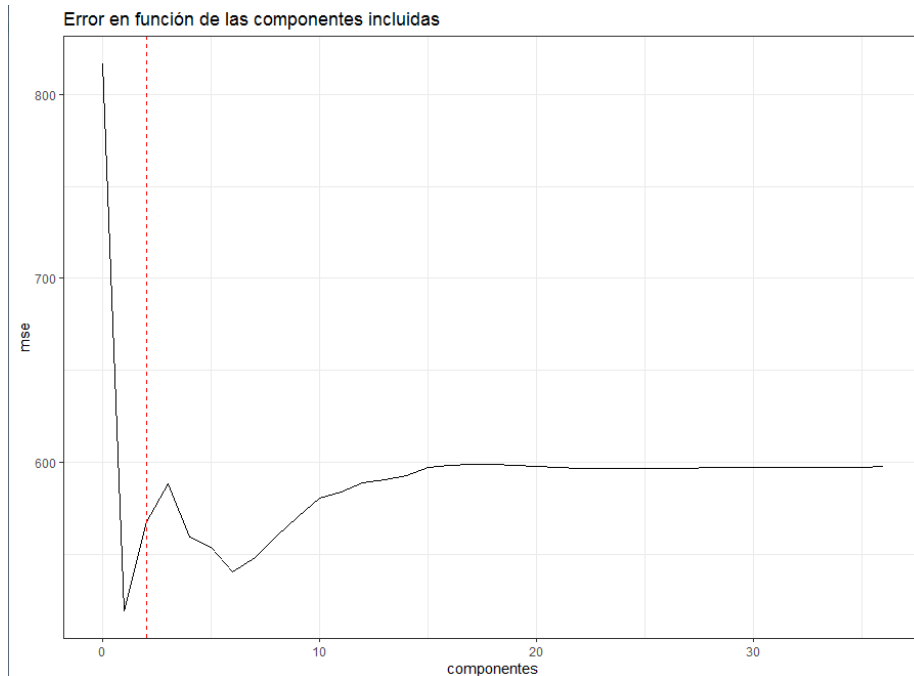


Imagen 18: Error del modelo con respecto al número de componentes
Fuente: Autor

3.3.5. Regresión Stepwise

Este modelo también es de reducción de dimensiones y su objetivo es comparar de manera iterativa variable por variable y quedarse con las variables que expliquen mejor el comportamiento de la variable a predecir y de una manera significativa estadísticamente hablando.

Para este caso se usó un proceso backward, el cual consiste en ir eliminando una a una las variables que no sean tan representativas en el modelo. Pero también se puede hacer un proceso forward, el cual es lo contrario, va agregando variables y deja aquellas que expliquen de manera más significativa el modelo.

3.3.6. Extreme Gradient Boosting

Este es uno de los modelos más precisos y completos que se han desarrollado, ya que su lógica se basa en la creación inicial de un modelo relativamente sencillo de predicción y a partir de este se empiezan a crear más modelos por medio de una búsqueda local, haciendo cada vez más y más robusto el modelo anterior. La complejidad de este tipo de métodos depende de la profundidad que se desea explorar, entre más profunda sea la búsqueda, más preciso será el modelo, aunque el tiempo de procesamiento también irá ligado a esta profundidad.

En este tipo de modelos se debe tener un especial cuidado a la hora de calibrar los parámetros ya que se pueden escoger algunos que no sean factibles y dañen la precisión del modelo y por otro lado se pueden tener otros que generen un “overfitting” es decir, que haya un sobreajuste.

3.4. Toma de datos en un escenario real.

Para verificar y validar cada uno de los modelos anteriormente descritos, se decidió tomar una intersección en particular. Para esto la intersección a analizar fue la de la calle 22 con carrera 3 en Bogotá, en la imagen 17 se puede observar que es una intersección que coincide con el escenario descrito en la sección 3.2.4.2, se cuenta con 3 semáforos viales y con 4 peatonales.



*Imagen 19: Calle 22 con Carrera 3 Bogotá, Colombia
Fuente: Google Maps*

Como el objetivo del proyecto es buscar la combinación correcta de cada una de las fases en el ciclo semafórico, se decidió analizar un espacio de 2 horas que son consideradas críticas en toda la ciudad. El tiempo de análisis fue desde las 16:00 horas hasta las 18:00 horas, momentos donde el flujo es mucho más alto en toda la ciudad según informes de movilidad.

El diseño actual de la intersección y como se muestra en la imagen 20, indica que en esta zona se tiene un tiempo de ciclo para los semáforos de 48 segundos en estado “Verde” de Este a Oeste, lo que a su vez son 48 segundos en estado “Rojo” en el sentido de Norte a Sur y de Sur a Norte. Luego se tiene una luz amarilla por 2 segundos (lo cual es estándar en la ciudad de Bogotá según la secretaría de movilidad).

Luego de esto, se empezaron a tomar los datos del tráfico, en especial la frecuencia de arribos en cada una de las partes de la intersección, como se ve en la tabla 7, se hicieron observaciones en intervalos de 15 minutos durante 10 días, estas observaciones se hicieron de lunes a viernes para que se tuviera en cuenta las restricciones que existen en la ciudad.

Las observaciones de la tabla 7 obedecen a los flujos provenientes del Oriente. Luego de esto se concluye que para esta vía en promedio pasan 17 vehículos por minuto.

Tabla 7: frecuencia de arribo

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10
16:00 - 16:15	120	90	135	120	105	75	105	105	150	120
16:15 - 16:30	165	165	180	105	150	105	120	150	165	165
16:30 - 16:45	165	165	180	180	150	180	165	150	150	180
16:45 - 17:00	225	210	180	210	195	180	195	210	210	195
17:00 - 17:15	330	330	240	330	255	300	345	360	375	285
17:15 - 17:30	420	390	405	450	390	390	405	420	420	450
17:30 - 17:45	302	390	405	360	390	345	360	390	375	405
17:45 - 18:00	304	255	300	285	285	270	240	240	255	180

Fuente: Autor

Este mismo método se usó para determinar los flujos provenientes del Sur y del Norte. Al mismo tiempo que se realizaba el conteo de vehículos, también se determinó la frecuencia con la que tomaban las distintas alternativas de destino, es decir, cuantos de los vehículos que provenían del este seguían su camino hacia el oeste, o tomaban una ruta al sur o al norte, dando como resultado la tabla 8

Tabla 8: Porcentajes de dirección promedio

Origen	Destino			
	Este	Oeste	Norte	Sur
Este	0,0%	35,0%	28,0%	37,0%
Oeste	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
Norte	0,0%	24,0%	0,0%	76,0%
Sur	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%

Fuente: Autor

Finalmente, para cada una de las vías, se calcularon los datos restantes y necesarios para poder ser modelados y así validar la información.

3.5. Validación.

Al realizar la simulación con los datos suministrados, se decide hacer la validación con la prueba de Kolmogorov-Smirnov donde se encontró que:

Tabla 9: Datos obtenidos en las observaciones y simulaciones

	Réplicas	Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación
Número de vehículos en 15 minutos simulados	200	75	450	248,7	4,326
Número de vehículos en 15 minutos observados	80	70	450	255,32	4,012

Fuente: Autor

De acuerdo con los datos de la tabla 9, se obtuvo que, según la prueba de Kolmogorov-Smirnov donde con un nivel de significancia de 0,05

H0: Las dos muestras cuentan con la misma distribución

Ha: Las dos muestras cuentan con diferente distribución

Los resultados arrojados dicen que con $\alpha = 0,05$, se tiene un P-value de 0,425, lo que indica que aceptamos la hipótesis nula (H_0) y que el riesgo de rechazar H_0 cuando es verdadera es de 42,5%

4. Resultados.

Luego de aplicar los modelos en RStudio, utilizando una base de datos creada a partir de AnyLogic, se encontró cual debería ser el mejor modelo a utilizar para esta situación en particular, así mismo, teniendo en cuenta que el modelo y los datos se ajustan a la realidad se crearon 10 nuevos escenarios de prueba para observar el rendimiento del modelo escogido en diferentes tipos de intersección, así como la intersección escogida como prueba.

4.1. Comparación de los modelos de regresión.

En esta sección se busca comparar los errores promedio de cada una de las dos variables a analizar. En la literatura existen más modelos que se pueden aplicar como redes neuronales o métodos basados en árboles.

4.1.1. Modelo de regresión para la “stopLine”

Se hizo cada modelo de manera minuciosa y buscando la configuración más indicada para cada modelo donde se comparará el MSE y a su vez se revisará el R^2 ajustado. En la imagen 20 se puede observar que el mejor modelo para predecir el “stopLine” es el “XGB”, esto se debe a que los parámetros que se usaron buscaban profundizar lo que más se pudo en el árbol de búsqueda de este algoritmo.

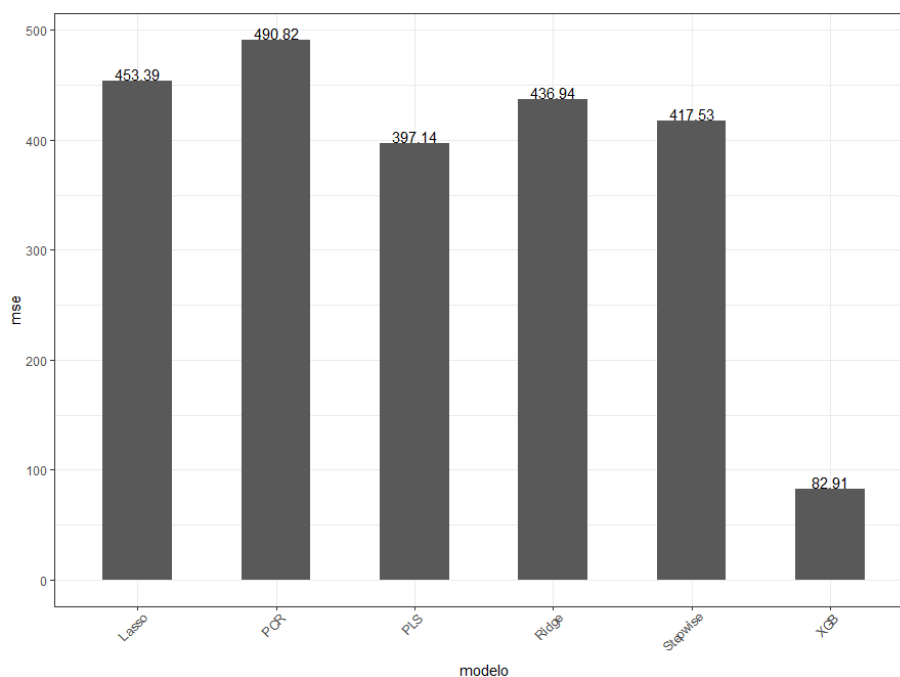


Imagen 20: Comparación de modelos de la “stopLine”

Fuente: Autor

4.1.2. Modelo de regresión para la “stopLine1”

Para la segunda fase del ciclo semafórico, se hizo el mismo proceso, se evaluó cual de los modelos se ajustaba más a la estructura de los datos, al igual que en el numeral 4.1.1, para este caso también se escogió el “XGB” como el mejor modelo, lo interesante es que presenta un MSE superior al de la “stopLine”, lo que nos lleva a pensar que la base de datos explica mejor el comportamiento de la primera variable que el de la segunda. En la imagen 21 se resumen los resultados alcanzados.

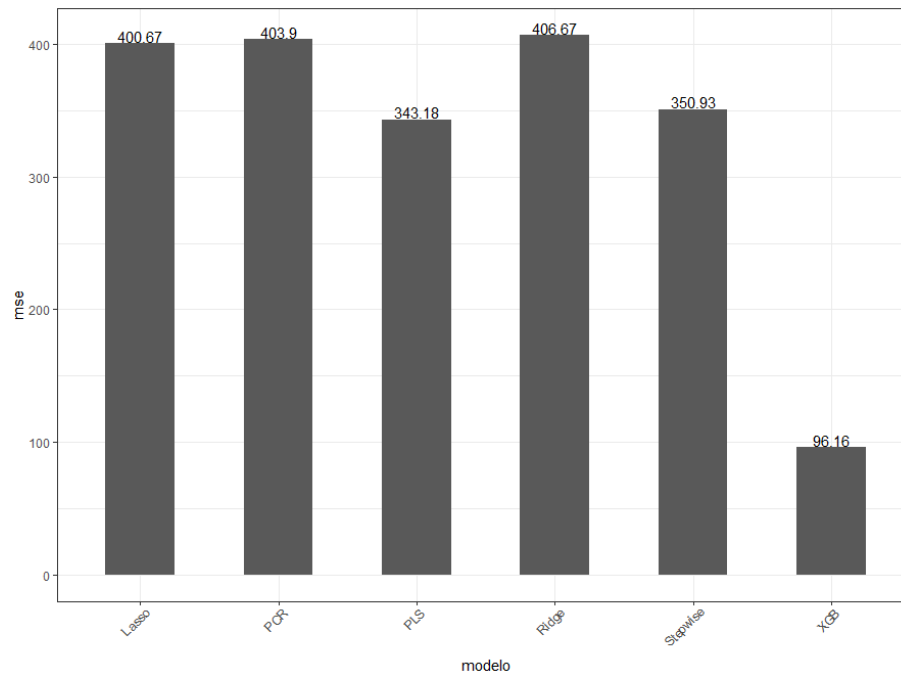


Imagen 21: Comparación de modelos de la “stopLine1”
Fuente: Autor

4.2. Evaluación y resultados de las configuraciones seleccionadas.

Dado factores externos como el aumento de flujo vehicular, ampliación de las vías o razones ajenas a la configuración normal de la vía, se plantearon 10 posibles situaciones a las que se puede ver expuesta una intersección vial con las características que se han venido teniendo en cuenta en este trabajo. Para determinar el tiempo de permanencia en el sistema para estas 10 configuraciones propuestas se usaron 3 métodos.

El primero fue simular la situación con el modelo realizado en AnyLogic con una cantidad de réplicas cercanas a las 200. Para poder determinar el tiempo de permanencia mínimo en el sistema, se recopilaron los promedios de permanencia de cada una de las réplicas y haciendo pruebas estadísticas de normalidad se comprobó que en el 95% de los casos es muy probable que la media este cercana al valor que se alcanzó en la simulación. Este tiempo se denominó “Tiempo Real”. Las fases semafóricas usadas en esta parte fueron 50 segundos en verde para el semáforo “stopLine” y 72 segundos en el semáforo “stopLine1”. Estos son los mismos tiempos que se tomaron de la intersección a analizar, todas las configuraciones se evaluaron en las mismas condiciones con el fin de tener más precisión

a la hora de saber cómo cambia el tiempo de permanencia en el sistema con respecto a las configuraciones evaluadas.

El segundo método que se utilizó fue el usar el mejor modelo de regresión para predecir el valor más adecuado para el “stopLine” y el “stopLine1” luego de predecir este valor en RStudio, se tomó el resultado y se procedió a simular de nuevo el modelo en AnyLogic con una cantidad de replicas cercanas a las 200 y al igual que en el método anterior, se realizaron las pruebas estadísticas donde se garantiza que el 95% de los datos van a tener de media el tiempo registrado. Este tiempo se denominó “Tiempo Regresión”.

Finalmente, el tercer método que se usó para determinar el tiempo medio en el sistema para cada configuración fue el usar los parámetros en el motor de optimización de AnyLogic y que fuera el programa quién dijera cual era el óptimo local (Tiempo_OPL) en esa réplica. Cada réplica que se hizo por configuración alcanzaba las 155 iteraciones y al igual que en los casos anteriores, el valor registrado es la media de todos los resultados.

Los resultados de todas las réplicas en cada una de las configuraciones tuvieron desviaciones relativamente bajas, lo que quiere decir que los resultados estuvieron muy cercanos entre sí.

4.2.1. Configuración 1

En la tabla 10 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 180,02 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 193,5 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 71,1 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 38,2.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 148,27 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 82 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 30.

Tabla 10: Parámetros configuración 1

Frec_OEste=18	Frec_OOeste=41	Frec_ONorte=53	Frec_OSur=16	VelP_OEste=27	VelP_OOeste=16
VelP_ONorte=18	VelP_OSur=27	AcelP_OEste=1,3	AcelP_OOeste=1,8	AcelP_ONorte=2	AcelP_OSur=0,6
Prob_EO=0,1	Prob_EN=0,9	Prob_ES=0	Prob_OE=0,5	Prob_ON=0	Prob_OS=0,5
Prob_NE=0	Prob_NO=0,2	Prob_NS=0,8	Prob_SE=0,9	Prob_SO=0	Prob_SN=0,1

Fuente: Autor

4.2.2. Configuración 2

En la tabla 11 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 121,93 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 144,02 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 49,8 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 45,5.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 103,015 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 22 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 66.

Tabla 11: Parámetros configuración 2

Frec_OEste=22	Frec_OOeste=0	Frec_ONorte=9	Frec_OSur=15	VelP_OEste=26	VelP_OOeste=0
VelP_ONorte=22	VelP_OSur=16	AcelP_OEste=0,8	AcelP_OOeste=0	AcelP_ONorte=1,9	AcelP_OSur=1,1
Prob_EO=0,3	Prob_EN=0,7	Prob_ES=0	Prob_OE=0	Prob_ON=0	Prob_OS=0
Prob_NE=0	Prob_NO=1	Prob_NS=0	Prob_SE=0	Prob_SO=0	Prob_SN=1

Fuente: Autor

4.2.3. Configuración 3

En la tabla 12 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 154 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 122,45 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 79,03 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 29,94.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 85,15 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 84 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 33.

Tabla 12: Parámetros configuración 3

Frec_OEste=17	Frec_OOeste=3	Frec_ONorte=0	Frec_OSur=4	VelP_OEste=22	VelP_OOeste=11
VelP_ONorte=0	VelP_OSur=10	AcelP_OEste=1,4	AcelP_OOeste=1,1	AcelP_ONorte=0	AcelP_OSur=1,1
Prob_EO=0,6	Prob_EN=0,4	Prob_ES=0	Prob_OE=0	Prob_ON=0	Prob_OS=0
Prob_NE=0	Prob_NO=0	Prob_NS=0	Prob_SE=0	Prob_SO=0,1	Prob_SN=0,9

Fuente: Autor

4.2.4. Configuración 4

En la tabla 13 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 230 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 138,04 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 88,34 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 21,81.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 55,68 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 90 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 20.

Tabla 13: Parámetros configuración 4

Frec_OEste=21	Frec_OOeste=18	Frec_ONorte=0	Frec_OSur=1	VelP_OEste=21	VelP_OOeste=26
VelP_ONorte=0	VelP_OSur=10	AcelP_OEste=1,5	AcelP_OOeste=1,7	AcelP_ONorte=0	AcelP_OSur=0,9
Prob_EO=0,5	Prob_EN=0,5	Prob_ES=0	Prob_OE=1	Prob_ON=0	Prob_OS=0
Prob_NE=0	Prob_NO=0	Prob_NS=0	Prob_SE=0	Prob_SO=0,1	Prob_SN=0,9

Fuente: Autor

4.2.5. Configuración 5

En la tabla 14 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 132 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 131,8 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 39,34 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 67,13.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 107,96 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 22 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 87.

Tabla 14: Parámetros configuración 5

Frec_OEste=0	Frec_OOeste=18	Frec_ONorte=24	Frec_OSur=17	VelP_OEste=0	VelP_OOeste=21
VelP_ONorte=10	VelP_OSur=28	AcelP_OEste=0	AcelP_OOeste=1,6	AcelP_ONorte=0,9	AcelP_OSur=0,8
Prob_EO=0	Prob_EN=0	Prob_ES=0	Prob_OE=0,2	Prob_ON=0,2	Prob_OS=0,6
Prob_NE=0	Prob_NO=0	Prob_NS=1	Prob_SE=0,1	Prob_SO=0	Prob_SN=0,9

Fuente: Autor

4.2.6. Configuración 6

En la tabla 15 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 114,01 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 105,66 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 33,58 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 77,5.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 90,979 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 23 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 88.

Tabla 15: Parámetros configuración 6

Frec_OEste=22	Frec_OOeste=0	Frec_ONorte=30	Frec_OSur=18	VelP_OEste=25	VelP_OOeste=0
VelP_ONorte=22	VelP_OSur=23	AcelP_OEste=0,9	AcelP_OOeste=0	AcelP_ONorte=1,1	AcelP_OSur=1,7
Prob_EO=0,1	Prob_EN=0,2	Prob_ES=0,7	Prob_OE=0	Prob_ON=0	Prob_OS=0
Prob_NE=0	Prob_NO=0,2	Prob_NS=0,8	Prob_SE=0	Prob_SO=0	Prob_SN=1

Fuente: Autor

4.2.7. Configuración 7

En la tabla 16 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 102 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 103,5 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 27,83 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 75,02.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 93,9 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 31 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 55.

Tabla 16: Parámetros configuración 7

Frec_OEste=8	Frec_OOeste=0	Frec_ONorte=29	Frec_OSur=27	VelP_OEste=20	VelP_OOeste=0
VelP_ONorte=16	VelP_OSur=22	AcelP_OEste=1,7	AcelP_OOeste=0	AcelP_ONorte=1	AcelP_OSur=1,5
Prob_EO=0,1	Prob_EN=0,5	Prob_ES=0,4	Prob_OE=0	Prob_ON=0	Prob_OS=0
Prob_NE=0	Prob_NO=0,2	Prob_NS=0,8	Prob_SE=0	Prob_SO=0	Prob_SN=1

Fuente: Autor

4.2.8. Configuración 8

En la tabla 17 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 52,6 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 42,98 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 29,89 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 51,94.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 41,64 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 20 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 64.

Tabla 17: Parámetros configuración 8

Frec_OEste=1	Frec_OOeste=2	Frec_ONorte=5	Frec_OSur=9	VelP_OEste=10	VelP_OOeste=30
VelP_ONorte=30	VelP_OSur=30	AcelP_OEste=1	AcelP_OOeste=1,8	AcelP_ONorte=1,8	AcelP_OSur=1,8
Prob_EO=0,8	Prob_EN=0,1	Prob_ES=0,1	Prob_OE=1	Prob_ON=0	Prob_OS=0

Prob_NE=0	Prob_NO=0	Prob_NS=1	Prob_SE=0	Prob_SO=0	Prob_SN=1
-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

Fuente: Autor

4.2.9. Configuración 9

En la tabla 18 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 157,6 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 130,15 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 71,38 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 27,58.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 188,93 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 24 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 87.

Tabla 18: Parámetros configuración 9

Frec_OEste=19	Frec_OOeste=7	Frec_ONorte=13	Frec_OSur=14	VelP_OEste=18	VelP_OOeste=29
VelP_ONorte=10	VelP_OSur=19	AcelP_OEste=1,6	AcelP_OOeste=1,8	AcelP_ONorte=2	AcelP_OSur=0,4
Prob_EO=0,5	Prob_EN=0,5	Prob_ES=0	Prob_OE=0,7	Prob_ON=0	Prob_OS=0,3
Prob_NE=0	Prob_NO=0,2	Prob_NS=0,8	Prob_SE=1	Prob_SO=0	Prob_SN=0

Fuente: Autor

4.2.10. Configuración 10

En la tabla 19 se presentan los parámetros usados para esta configuración. Después de realizar los tres procesos anteriormente mencionados se obtuvo que el “Tiempo Real” es de 105,7 segundos con la configuración semafórica mencionada en el numeral 4.2.

En el caso del “Tiempo Regresión” se obtuvo un tiempo de 129,63 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 26,58 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 75,28.

Por último, el “Tiempo_OPL” se obtuvo un tiempo de 93,54 segundos y un tiempo para la fase en verde de la “stopLine” de 35 segundos y para la fase en verde de la “stopLine1” de 50.

Tabla 19: Parámetros configuración 10

Frec_OEste=8	Frec_OOeste=0	Frec_ONorte=25	Frec_OSur=15	VelP_OEste=28	VelP_OOeste=0
VelP_ONorte=13	VelP_OSur=17	AcelP_OEste=1,9	AcelP_OOeste=0	AcelP_ONorte=1,7	AcelP_OSur=0,2
Prob_EO=0,4	Prob_EN=0,3	Prob_ES=0,3	Prob_OE=0	Prob_ON=0	Prob_OS=0
Prob_NE=0	Prob_NO=0,2	Prob_NS=0,8	Prob_SE=0	Prob_SO=0	Prob_SN=1

Fuente: Autor

4.3. Comparación de las configuraciones.

En la imagen 22 se puede observar cual fue el desempeño de cada una de las configuraciones de acuerdo a las 3 maneras de calcular el tiempo de ciclo semafórico. Allí se puede observar que en todas las configuraciones el mejor desempeño lo tuvo el óptimo local ya que AnyLogic cuenta con motor de optimización bastante potente para este tipo de situaciones, el único problema es que no es un software libre y la versión de estudio personal está bastante restringida para este tipo de situaciones.

Luego se tienen los resultados arrojados por el modelo predictivo, allí podemos observar que los tiempos fueron superiores en 3 de las 10 configuraciones, teniendo en cuenta que el R^2 dio un ajuste cercano al 68%, se podría decir que es bastante bueno ya que logra disminuir los tiempos medios de espera en el sistema con respecto a los reales en 7 de 10 configuraciones.

En promedio para situaciones como las de las configuraciones presentadas, se logró una reducción en el tiempo de viaje de las personas en un 14,58%, lo que para una persona promedio bogotana significaría una reducción de 35,71 horas al año dentro del tráfico.

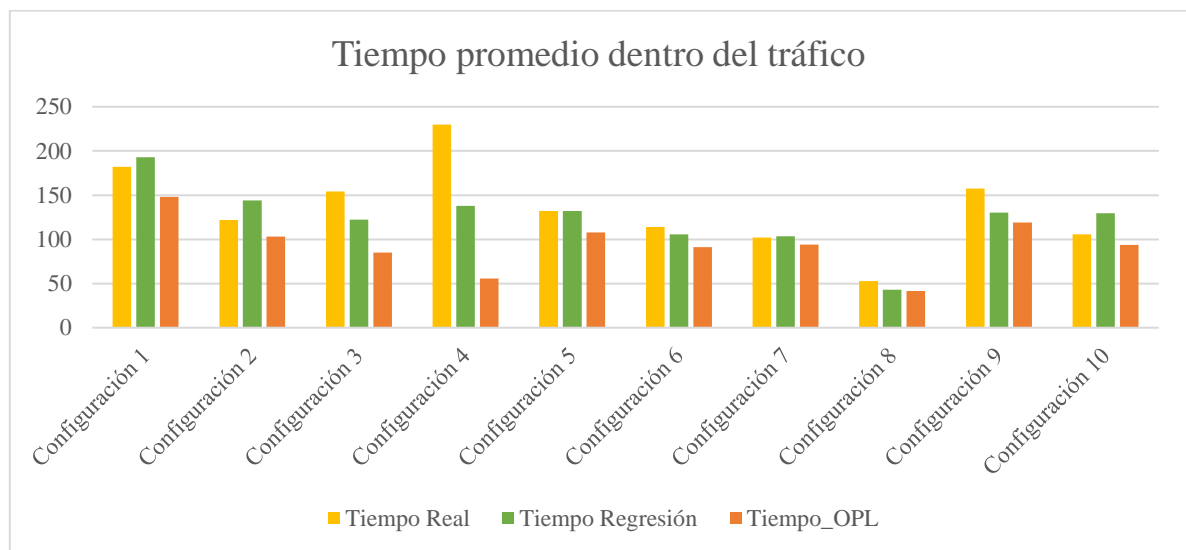


Imagen 22: Comparación de tiempos promedio en el sistema por configuración
Fuente: Autor

Los resultados anteriores se pueden categorizar de acuerdo a una escala propuesta por National Research Council, en la imagen 23 se presenta el nivel de servicio de acuerdo al tiempo promedio de espera en cola.

NIVEL DE SERVICIO	CARACTERISTICAS DE LA OPERACION	DEMORAS (Segundos)
A	Baja demora, sincronía extremadamente favorable y ciclos cortos, los vehículos no se detienen	< 10
B	Ocurre con una buena sincronía y ciclos cortos, los vehículos empiezan a detenerse	10 – 20
C	Ocurre con una sincronía regular y/o ciclos largos, los ciclos en forma individual empiezan a fallar	20 – 35
D	Empieza a notarse la influencia de congestión ocasionados por un ciclo largo y/o una sincronía desfavorable o relaciones v/c altas, muchos vehículos se detienen.	35 – 55
E	Es el límite aceptable de la demora, indica una sincronía muy pobre, grandes ciclos y relaciones v/c mayores, las fallas en los ciclos son frecuentes	55 – 80
F	El tiempo de demora es inaceptable para la mayoría de los conductores, ocurren cuando los valores de flujo exceden la capacidad de la intersección o cuando las relaciones v/c son menores a 1 pero con una sincronía muy pobre y/o ciclos demasiados largos	> 80

Imagen 23: Nivel de servicio de acuerdo al tiempo de espera en el semáforo
Fuente: (National Research Council, 2000)

5. Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

Los modelos predictivos en general requieren de una amplia base de datos para ser más precisos, es por eso que si se llegara a tener una data mucho más amplia y diversa seguramente se podrían lograr resultados más cercanos a los valores óptimos. Hoy en día este tipo de modelos se usan en muchos campos, desde el mercado bursátil hasta la predicción del clima. En general, es una herramienta de mucha utilidad y que vale la pena explorar.

Se evaluaron distintos escenarios y configuraciones con el fin de reducir los tiempos de espera medios de las personas en el tráfico, no en todos los casos se cumple el nivel de servicio deseado ya que en la mayoría de casos se exceden los 80 segundos y según la imagen 23 este es un servicio deficiente y puede deber a dos factores, el primero es una mala configuración en el ciclo semafórico y el segundo es porque el flujo vehicular excede la capacidad real de la vía. En la mayoría de trabajos que se han realizado en Latinoamérica, se ha encontrado que las vías no son suficientes para soportar el tráfico actual.

A pesar de que en Bogotá se han implementado medidas para reducir el tráfico como lo son el pico y placa, estas medidas no son realmente útiles ya que no se cumple en algunos casos porque existen excepciones que bien pueden ser beneficios sociales como el carpooling (carro compartido), también se puede saltar esta medida realizando un pago diario, semanal, mensual o semestral.

Trabajos como este permiten anticiparse a situaciones que puede impactar de manera considerable el tráfico como el cierre temporal de alguna vía de acceso, así mismo es una herramienta de toma de decisión en muy corto tiempo ya que como los modelos están elaborados, solo se requiere las configuraciones nuevas que se deseen estimar y con ese se aplica el modelo de regresión propuesto.

Para trabajos futuros se espera poder ampliar esta generalización para intersecciones más complejas, con más fases e interacciones entre las vías, así como la simplificación de la aplicación del modelo, creando una interfaz práctica donde el usuario pueda ingresar los parámetros y el modelo le devuelva la predicción de las variables.

Se espera poder ampliar la cantidad de configuraciones dentro de la base de datos para aumentar la precisión del modelo de regresión, así como probar otras alternativas que permitan evaluar su desempeño frente al modelo aquí propuesto.

6. Referencias.

- Alcaldía de Bogotá. (2005). *Formulación del plan maestro de movilidad para Bogotá D.C. Que incluye ordenamiento de estacionamientos*. Bogotá.
- Alcaldía de Bogotá. (2020). *Bogotá como vamos*. Obtenido de <https://bogotacomovamos.org/preocupa-crecimiento-de-parque-automotor/>
- Argos. (2020). *360 En concreto*. Obtenido de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/historia-de-pavimentos-de-concreto-en-colombia#:~:text=El%20primer%20pavimento%20en%20Colombia,entre%20otras%20circunstancias%2C%20provocaron%20inconformidad>
- Ballén Duque, F. (2007). Derecho a la movilidad. La experiencia de Bogotá D.C. *Prolegómenos. Derecho y Valores*, 169-181.
- Bogotá como vamos. (2020). *Bogotá como vamos*. Obtenido de <https://bogotacomovamos.org/preocupa-crecimiento-de-parque-automotor/>
- Callejas Chinchilla, J. F., & Villamizar Molina, O. &. (2016). Modelación de diseño operacional de intersecciones de la carrear 7° con calle 39 y calle 85, Bogotá, con implementación de pasos elevados para el tren ligero.
- Camacho, J., Medina, S., & Terán, O. (2012). Simulación del tráfico de autos en una intersección: desde la perspectiva de una plataforma multiagente. *Ciencia e Ingeniería Vol 33*, 85-94.
- Camejo Corona, J., Gonzalez, H., & Morell, C. (2019). Los principales algoritmos para regresión con salidas múltiples. Una revisión para Big Data. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 118-150.
- Carvajal Torres, A. &. (2021). Análisis de movilidad vehicular en el puente del canal Bogotá ubicado en la Avenida 6 AN en la zona industrial de la ciudad de San José de Cúcuta, mediante la simulación discreta.
- Catorce6. (8 de Septiembre de 2016). *Catorce6*. Obtenido de <https://www.catorce6.com/actualidad-ambiental/bienestar/12323-si-va-a-manejar-que-no-se-en-un-trancon>
- D'Ambrogio, A., & Iazeolla, G. &. (2009). Simulation model building of traffic intersections. *Elsevier*, 625-640.
- Diaz Ivorra, M. d., & Diaz Ivorra, F. &. (2002). Influencia de la geometría en la determinación de los puntos de conflicto en una intersección de viales. *XIV Congreso de Ingeniería Gráfica*.
- El Tiempo. (22 de Febrero de 1997). En Bogotá circulan cerca de 700.000 autos. *El Tiempo*.
- especifica, N. (2010). *Trafico vehicular*. Obtenido de <https://traficovehicularsibd.weebly.com/>
- Fontecha Cohen, J. M. (2019). Análisis de alternativas viales en la intersección de la transversal 1e con avenida Los Muiscas.
- Forbes. (10 de Marzo de 2021). *Forbes Colombia*.
- Frakt, A. (7 de Febrero de 2019). Atascado y estresado: Cómo afecta el tráfico a tu salud. *New York Times*.
- Gómez, E. (2009). Desarrollo de un modelo de simulación vehicular para la mejora en la sincronización de semáforos. *INAOE*.

- González, M. &. (2010). Aplicación de teoría de colas en los semáforos para mejorar la movilidad en la carrera 7 entre calles 15 y 20 de la ciudad de Pereira.
- Hoyos, D. &. (2010). Un modelo de simulación multiagente de una intersección semaforizada considerando interacción entre peatones y vehículos.
- Instituto de desarrollo urbano. (2003). *Inventario y diagnóstico malla vial de Bogotá D.C.* Bogotá D.C.
- INVIAS. (25 de Enero de 2018). *INVIAS*. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/servicios-al-ciudadano/glosario/131-glosario-manual-senalizacion-vial>
- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2017). *An introduction to statistical learning with applications in R*. Springer.
- López León, I., & Vásquez Castro, D. &. (2020). Análisis del tránsito vehicular y la señalización en la intersección ubicada en la calle 23 con carrera 23 en el barrio Retiro de la ciudad de Villavicencio, Meta, Colombia.
- Moreno Quintero, E. &. (2019). Modelos de probabilidad en transporte e ingeniería. Usos comunes y ajustes de datos.
- National Research Council. (2000). *Highway Capacity Manual*. Nancy A. Ackerman.
- Olstam, J. &. (2011). A review of guidelines for applying traffic simulation to level-of-service analysis. *Procedia social and behavioral sciences*, 771-780.
- Ossorio, J. (2020). *Pinterest*. Obtenido de <https://co.pinterest.com/pin/622833823451135215/>
- Papageorgiou, M., Diakaki, C., Dinopoulou, V., & Kotsialos, A. &. (2008). Review of road traffic control strategies.
- Pop, M.-D. (2018). Traffic Lights Management Using Optimization Tool. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 323-330.
- Portafolio. (16 de Agosto de 2019). Así afecta su productividad la congestión de la ciudad. *Portafolio*.
- Ramirez Pardo, D. C. (2015). Programación semaforal para mejorar el nivel de servicio peatonal en la intersección de la Av. Caracas con Cl 13 en la ciudad de Bogotá.
- Ramos Castillo, L. (2018). Regresión Lasso.
- Ramos Cuito, M. U. (2019). Evaluación de la capacidad vehicular y niveles de servicio en intersecciones semaforizadas del corredor vial prolongación Av. De la Cultura en el distrito de San Sebastián y propuesta de solución. 1-329.
- Renting Finders. (2022). *Rentingfinders*. Obtenido de <https://rentingfinders.com/glosario/interseccion/>
- Robles, D., & Ñañez, P. &. (2009). Control y simulación de tráfico urbano en Colombia: Estado del Arte.
- Sánchez, P., & Villa, F. (2012). Modelado y simulación del problema de movilidad vehicular en un sistema de intersecciones semaforicas. *Lámpsakos*, 15-22.
- Schmid, A. (2016). La simulación de peatones en la planificación del transporte. *Andinatraffic*.
- Secretaría de Movilidad de Bogotá. (2020). *Lineamientos técnicos en materia de seguridad vial para entidades externas. Tema: Semaforización*. Bogotá.
- Secretaría de Movilidad de Bogotá. (2015). *Movilidad en cifras 2015*. Bogotá.
- Secretaria de movilidad de Medellín. (2020). *Medellín.gov.co*. Obtenido de https://www.medellin.gov.co/movilidad/documents/seccion_senalizacion/cap7_sem_aforos.pdf

- Statista. (2020). *Statista*. Obtenido de <https://www.statista.com/statistics/1023100/most-traffic-jam-prone-cities-worldwide/>
- Suárez Bermúdez, O. (2019). Propuesta de mejoramiento operacional de la intersección Avenida Ciudad de Cali con Calle 72 en la ciudad de Bogotá, mediante microsimulación.
- Thomson, I. &. (2001). *La congestión del tránsito urbano: Causas y consecuencias económicas y sociales*. Santiago de Chile: CEPAL.
- Torres, P. (2012). Simulación del tráfico en una vía expresa y análisis estadístico de los resultados. *Ingeniería Industrial*, 45-79.
- Tovar Perdomo, M., Ramírez Caicedo, J. M., Del Castillo Romo, M., & Naranjo Torres, D. &. (2016). Identificación de modelos de simulación de tráfico vehicular para solución de conflictos por demoras en intersecciones - Revisión temática.
- Toyocosta. (2021). *Toyocosta*. Obtenido de <http://www.toyocosta.com/blog/uso-de-los-carriles-al-conducir/>
- Vargas, R. (2003). Análisis de los factores de congestión vehicular para la malla arterial principal de Bogotá D.C.
- Ziad Tarek, A., & Cabrera, F. &. (2020). Análisis del congestionamiento vehicular para el mejoramiento de vía principal de Guayaquil-Ecuador. *Gaceta Técnica*, 4-23.