



**Asignatura:**

Proyecto de Grado

**PROYECTO DE GRADO**

Determinación de la mejor opción de cierre ante la existencia de un incidente vial en la calzada sur-norte de la Avenida Carrera 30 entre Calle 53B y Calle 63 en la ciudad de Bogotá

**Presenta:**

Oscar Fernando Díaz Cuevas

Código: 10481616821

**Modalidad:**

Monografía

Bogotá, Noviembre de 2020

## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
3.	MARCO CONCEPTUAL.....	5
3.1.	CORRIENTES VEHICULARES .....	8
3.1.1.	Vehículo .....	8
3.1.2.	Pelotones y colas .....	10
3.2.	PARÁMETROS MICROSCÓPICOS .....	10
3.3.	PARÁMETROS MACROSCÓPICOS.....	11
3.3.1.	Volumen de tránsito .....	11
3.3.2.	Velocidad .....	14
3.3.3.	Densidad.....	15
3.4.	CONGESTIÓN.....	15
3.4.1.	Congestión relacionada con incidentes viales.....	15
3.4.2.	Cuello de botella.....	18
3.5.	PTV-VISSIM .....	18
3.5.1.	Modelo de seguimiento .....	20
3.5.2.	Modelo de cambio de carril.....	22

3.5.3.	Modelo de comportamiento lateral .....	23
3.5.4.	Modelo de reacción a la luz amarilla .....	23
4.	ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	25
5.	FORMULACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	33
5.1.	JUSTIFICACIÓN .....	36
5.2.	PERTINENCIA SOCIAL.....	37
6.	METODOLOGÍA .....	39
6.1.	CARACTERIZACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR .....	39
6.2.	ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO .....	44
6.2.1.	Descripción del modelo.....	44
6.2.2.	Configuración del modelo.....	46
6.2.3.	Carriles .....	46
6.2.4.	Rutas.....	48
6.2.5.	Nodos de evaluación .....	50
6.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO .....	51
6.3.1.	Calibración por volúmenes.....	52
6.3.2.	Calibración por velocidades .....	54
6.4.	ESCENARIOS DE EVALUACIÓN .....	56
6.5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	58
7.	CONCLUSIONES .....	67

8.	RECOMENDACIONES .....	69
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

## 1. INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de cualquier actividad, en su mayoría, las personas deben desplazarse de un sitio a otro; con la formación de una cotidianidad la gente tiende a desarrollar una ruta típica en la cual emplea su medio de transporte predilecto, o la mezcla de varios medios. Así las cosas, mediante un ejercicio de “ensayo-error”, los individuos aprenden a identificar instintivamente variables como el tiempo de viaje y horas de máxima demanda vehicular, para el camino que habitualmente utiliza. Tal es así, que instintivamente las personas reconocen, sin saber la causa exacta, de la existencia de una anomalía en el comportamiento de la movilidad en una vía en particular.

Es evidente que la existencia de un siniestro vial genera demoras en el tráfico aguas arriba en la vía donde ocurre el accidente. Sin ondear en la gravedad del siniestro, inevitablemente los vehículos que circulan por la vía del incidente son objeto de demoras, que, abstrayendo en costo, genera grandes pérdidas económicas para la ciudadanía, tal y como veremos más adelante.

Durante el desarrollo del presente documento se evidenciará la carencia de políticas gubernamentales enfocadas en atenuar el impacto de la siniestralidad vial en vías urbanas. De tal forma que, con el empleo de conceptos teóricos de la Ingeniería de Tránsito, así como de herramientas informáticas, se originará una monografía que será el principio del futuro desarrollo de potenciales documentos que instruyan, tanto a las autoridades, como a la ciudadanía en general, sobre cierres viales que agilicen la movilidad ante la presencia de un siniestro vial, y no entorpezca las labores de las autoridades y unidades de emergencia.

Cabe destacar que, en torno a la aplicación de modelos de tránsito, en un programa de computadora especializado para el tema, la Ingeniería de Tránsito ha descargado el análisis de

problemáticas relacionadas con la infraestructura y el comportamiento de los actores viales. Por esta razón, y teniendo en cuenta la carencia expuesta, resulta atractivo el empleo de este tipo de herramientas para el análisis de tiempos de demora, y colas generadas, por un siniestro vial.

Entre los proyectos desarrollados en Colombia donde se emplea este tipo de herramientas tenemos el Estudio de Tránsito para el Sistema Estratégico de Transporte Público del municipio de Montería (Ministerio de Transporte, 2020), Actualización del Estudio de Tránsito para la Ruta del Sol sector II (Agencia Nacional de Infraestructura-ANI, 2020), entre otros.

## 2. OBJETIVOS

Evaluar, mediante la utilización de un programa de computadora especializado (PTV-VISSIM), las diferentes alternativas de cierre, en función del número de carriles ocupados por un eventual siniestro vial, de tal forma que se minimicen las demoras de tránsito y las colas vehiculares aguas arriba del lugar del accidente.

### 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Contextualizar la problemática generada por los siniestros viales, enfocándose en el tiempo que pierden las personas que se encuentran en un vehículo aguas arriba de un accidente.
- Presentar la experiencia local, e internacional, con los cierres temporales en vías urbanas; destacando que la experiencia local se enfoca en cierres para obra, y la internacional en cierres para siniestros sobre vías interestatales o de alta velocidad.
- Destacar los principios teóricos, así como los parámetros que componen el desarrollo de un modelo de tránsito en un programa de computadora especializado.
- Desarrollar varios modelos de tránsito, donde se aplique en principio, la experiencia local e internacional, frente a los cierres temporales de vías, para posteriormente contrastar las variaciones de los modelos de tránsito previamente construidos, con el fin de lograr un abanico de alternativas de cierres viales.
- Generar y analizar los resultados de los modelos de tránsito, enfocándose en que las alternativas de cierre deben generar el menor tiempo de demoras de tránsito y de colas vehiculares.
- Plasmar gráficamente, la mejor alternativa de cierre, en función del número de carriles ocupados por los vehículos involucrados en el siniestro vial, así como de la autoridad y de las unidades de emergencia presentes en el lugar.





### 3. MARCO CONCEPTUAL

La concepción de un documento que mencione las alternativas de cierre ante un accidente en la calzada sur-norte de la Carrera 30 entre Calle 53B y Calle 63, está envuelto en el área de la ingeniería de tránsito. Para llevar a cabo un análisis concienzudo se debe tener en cuenta conceptos como “volumen de tránsito”, el cual hace referencia al número de vehículos y personas circulan en punto de control. Igualmente se debe conocer la “hora de máxima demanda”, correspondiente al periodo en el cual el volumen de tránsito logra un pico.

Por otra parte, como el análisis implica la utilización de un software especializado en tránsito, resulta indispensable conocer el sustento teórico que tiene dicho programa. El PTV-VISSIM se basa en tres modelos de comportamiento vehicular, el primero hace referencia al comportamiento de un vehículo que sigue a otro; básicamente es un modelo Psicofísico, desarrollado por el alemán Rainer Wiedemann en 1974. El modelo tiene dentro de sus variables aspectos físicos y psicológicos experimentados por los conductores (Saniger, 2013). El modelo predice, por ejemplo, que un conductor desacelerará su vehículo a medida que se acerca a uno más lento. El segundo modelo hace referencia al cambio de carril; para VISSIM existen dos tipos de cambios el “libre” y el “necesario”; el libre se hará cuando un vehículo ve espacio en otro carril, el cual le permite viajar a la velocidad que quiera, el necesario se realizará cuando un vehículo debe girar en una intersección, por lo tanto debe cambiarse al carril más próximo al giro. El tercer modelo predice el comportamiento lateral, es decir, la distancia a la cual pueden llegar a estar dos vehículos que circulan paralelamente.

Además al PTV-VISSIM, existen otros programas de simulación de tráfico en el mercado, y que son manejados por los ingenieros especialistas en tránsito, entre ellos se encuentran Synchro Traffic desarrollado por la empresa CUBIC-Trafficware, TransModeler desarrollad por Caliper y

el software Aimsun desarrollado por la empresa del mismo nombre. Todos estos simuladores de tráfico son de amplio uso en la ingeniería de tránsito, sin embargo, Synchro y TransModeler no cuentan con simuladores DEMO o Educativos, por lo cual su empleo se dificulta ya que se tendría que adquirir la licencia; por su parte el Aimsun recientemente ha entrado en el mercado colombiano, sin embargo, revisando su empleabilidad, esta se enfoca en el desarrollo de modelos que involucran vehículos autónomos (Xie, 2015).

El efecto de la accidentalidad sobre la movilidad del tramo vial donde este se presenta, lo percibe cualquier usuario que haya tenido que sobrellevar una situación de esta índole, esto expresado en un mayor tiempo para desplazarse de un lugar a otro al comparar una situación con accidente o sin accidente. La gravedad del accidente está relacionada al tipo de vehículo que se encuentra siniestrado, generalmente cuando en un accidente se involucra un vehículo de carga, el cierre de la vía puede llegar hasta las 12 horas (Transportation Research Board, 2010).

Investigaciones han mostrado que en promedio un incidente de tráfico puede generar cierres de 37 minutos; la mitad de los accidentes generan demoras de que no superan los 30 minutos, e inclusive el 82% de los incidentes generan demoras inferiores a los 13 minutos (Transportation Research Board, 2010). Es importante destacar que esta información corresponde a incidentes en vías de los Estados Unidos.

El efecto inmediato de un accidente sobre la movilidad se ve reflejando en el cierre de uno o varios carriles, reduciendo ostensiblemente la capacidad de la vía. Dependiendo el número de carriles afectados, la vía verá reducida su capacidad de alojar vehículos. Esta reducción de la capacidad deriva en la formación de colas.

Cuando el incidente se presenta en una vía multicarril, donde ocupa una o varias de las líneas, pero sigue permitiendo el flujo vehicular, se relacionará la longitud de la cola de vehículos con la longitud de transición que se emplee para sobrellevar el accidente.

Se ha investigado sobre situaciones donde en una vía multicarril se presenta una reducción en el número de líneas, generándose un “cuello de botella” allí (Espindola, 1994), estos trabajos tienen como finalidad definir la cantidad de vehículos que se acumulan en una cola. Sin embargo, dentro de estas investigaciones no se ha relacionado la transición de las reducciones de carril asociándolo con incidentes viales.

Los cuellos de botella se presentan en tramos de flujo continuo donde se reduce la sección transversal, es decir, se reducen los carriles. Esta situación lleva a que la tasa de llegada supera la capacidad de salida, por lo tanto, se generan las colas.

Por otra parte, el software de evaluación de tránsito se basa en un modelo Psicofísico, desarrollado por el alemán Rainer Wiedemann en 1974. El modelo tiene dentro de sus variables aspectos físicos y psicológicos experimentados por los conductores (Saniger, 2013). El modelo predice, por ejemplo, que un conductor desacelerará su vehículo a medida que se acerca a uno más lento.

Otra línea de estudio sobre el tema han sido los cierres viales debidos a intervenciones de bajo impacto en vías multicarril. Cuando las obras implican un cierre parcial de la vía, deben implementar transiciones que disminuyan el efecto del cierre sobre la movilidad del sector. Se ha llegado a tal detalle que la longitud de las transiciones se puede calcular en función de la velocidad permitida en el tramo y del ancho de un carril en el mismo (American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO, 2011).

Ya que la velocidad de flujo ante un incidente vial disminuye dramáticamente, puede que la longitud de la transición en algún instante deje de depender de la velocidad y pase a ser más dependiente del volumen vehicular, así como del ancho del carril. Entonces ahí es donde entra el software de modelación que permitirá determinar cuál es la longitud adecuada de la transición para generar la menor cola, y por ende la menor demora posible tras el cierre parcial de una vía multicarril.

### **3.1. CORRIENTES VEHICULARES**

Las corrientes vehiculares hacen referencia a las filas de vehículos que circulan por una calzada en un mismo sentido. En las vías de dos carriles, calzadas bidireccionales, se cuenta con la presencia de dos flujos, uno opuesto al otro; en vías multicarriles, los vehículos que acomodan por carriles generando un “ordenamiento” del tráfico, en un mismo sentido.

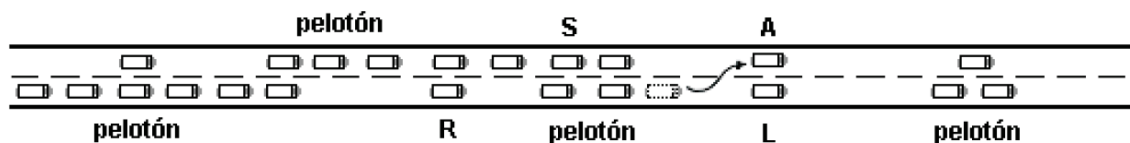
Las corrientes vehiculares son condicionadas por su entorno, lo que da cabida a clasificar las vías en dos grandes grupos, las que presentan una circulación o flujo continuo y las que tienen interrupciones. En las vías con flujo continuo los vehículos circulan libremente, donde su velocidad se compromete por la interacción con otros vehículos dentro de la misma corriente; un ejemplo de este tipo de vías son las autopistas o carreteras nacionales con dos calzadas unidireccionales. Por otra parte, las vías con flujo discontinuo son aquellas en que los vehículos deben detenerse frecuentemente, por ejemplo, las vías urbanas controladas por señales “pare” o semáforos.

#### **3.1.1. Vehículo**

Un vehículo dentro de la corriente vehicular presenta diferentes estados en función de su interacción con los demás o con la condición que presente en un instante de tiempo. A continuación, se describen los estados de un vehículo dentro de la corriente vehicular.

- Vehículo libre (L): un vehículo circula libre mientras su velocidad sea la deseada por el conductor, adicionalmente sus maniobras no están condicionadas a la presencia de otros vehículos en la vía. En vías de flujo continuo los vehículos libres pueden cambiar de carril sin verse afectada su velocidad. En vías con flujo discontinuo, los vehículos pueden circular libremente hasta tomarse con una regulación como un semáforo o señal de tránsito.
- Vehículo restringido (R): corresponde a un vehículo que debe disminuir su velocidad debido a la presencia de otro vehículo delante, sin embargo, su velocidad es mayor a los vehículos que lo preceden.
- Vehículo en seguimiento (S): un vehículo se encuentra en este estado cuando alcanza a otro pero no le es posible adelantar, por lo tanto el vehículo debe circular a la misma velocidad que su antecesor en el flujo para evitar un choque.
- Vehículo adelantando (A): es cuando un vehículo realiza una maniobra de adelanto, para lo cual debe incrementar su velocidad por encima del vehículo que lo antecede en el flujo.
- Vehículo detenido (D): se considera un estado anormal en vías de flujo continuo, mientras en vías de flujo discontinuo se presentan frecuentemente.

Figura 1 Corriente vehicular en vía unidireccional de dos carriles



Fuente: (Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, 2005)

### 3.1.2. Pelotones y colas

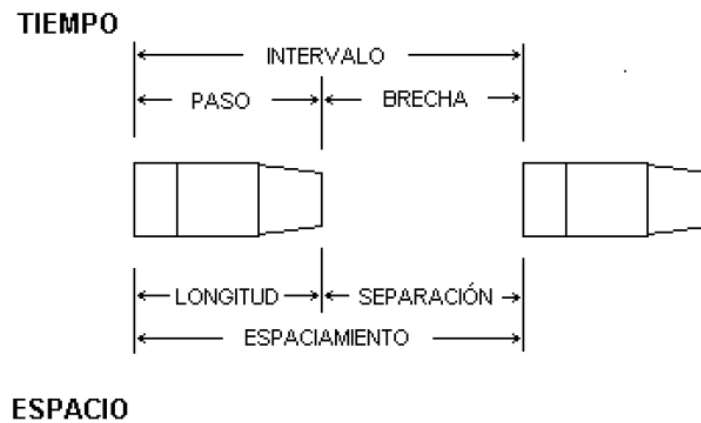
Los pelotones son un conjunto de vehículos que circulan uno tras de otro por un mismo carril. La cabeza de pelotón corresponde a un vehículo “libre” cuya velocidad es la deseada, mientras es seguido por uno o más vehículos en seguimiento.

Una cola es una hilera de vehículos detenidos o con una velocidad baja.

### 3.2. PARÁMETROS MICROSCÓPICOS

Los parámetros microscópicos son de dos tipos, temporales y espaciales. En la Figura 2 se aprecian gráficamente estos parámetros.

Figura 2 Parámetros microscópicos de una corriente vehicular



*Fuente: (Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, 2005)*

A continuación, se definen los parámetros temporales:

- **Intervalo:** tomando como referencia un punto en la vía, es el tiempo que transcurre desde el paso del extremo posterior del vehículo que va por delante, y el paso del extremo trasero del vehículo rezagado por ese mismo punto.

- Brecha: tomando como referencia un punto en la vía, es el tiempo que transcurre desde el paso del extremo posterior del vehículo que va por delante, y el paso del extremo frontal del del vehículo rezagado por ese mismo punto.
- Paso: es el tiempo que demora en recorres un vehículo su propia distancia.

Los parámetros espaciales se definen de la siguiente forma:

- Espaciamiento: es la distancia medida entre los topes posteriores de dos vehículos que se encuentran un tras del otro en una corriente vehicular.
- Separación: es la distancia medida desde el extremo posterior de un vehículo y el frente del vehículo rezagado en la corriente vehicular.
- Longitud: es la longitud de un vehículo.

### **3.3. PARÁMETROS MACROSCÓPICOS**

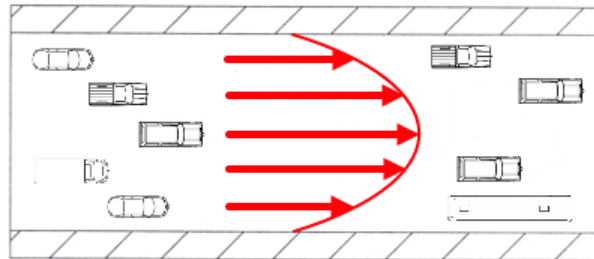
#### **3.3.1. Volumen de tránsito**

Los volúmenes vehiculares se consideran dinámicos, sin embargo, sus variaciones son rítmicas y repetitivas. Los volúmenes vehiculares tienen características que se ven definidas por el espacio y tiempo; espacialmente no es el mismo el volumen vehicular que circula en una vía interurbana, que el volumen vehicular de una vía urbana. Por otra parte, el volumen de una vía no es el mismo en temporada de Semana Santa, que en un día laboral típico.

- Distribución espacial de los vehículos: en vías urbanas, con calzadas unidireccionales y con 3 o más carriles, la distribución espacial de los vehículos dentro de la calzada tiene un comportamiento “hidráulico” de una tubería a presión (ver Figura 3), es decir, la mayor capacidad y velocidad dentro de la corriente vehicular se presenta en los carriles centrales debido a la “fricción lateral”, que para el caso de tránsito estaría representada por la parada

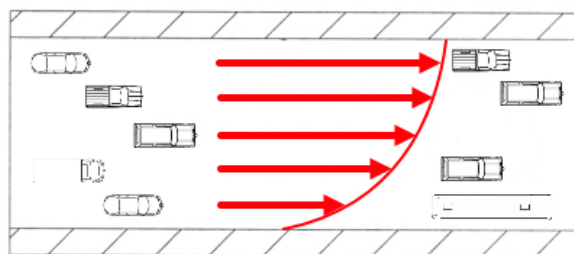
de buses, los accesos vehiculares en las márgenes de la vía y la presencia de giros izquierdos y derechos. En carreteras interurbanas, en nuestro país las vías “doble calzada”, cuentan con dos calzadas unidireccionales de dos carriles; en este caso las mayores velocidades y los adelantos entre vehículos, se presenta en el carril más próximo al separador (ver Figura 5). En vías urbanas rápidas, es decir, que únicamente presentan intersecciones a desnivel y no tienen giros izquierdos y cuentan con más de tres carriles, las mayores velocidades se desarrollan en el carril inmediato al separador (ver Figura 4).

Figura 3 Perfil de velocidad en vías con accesos vehiculares en ambas márgenes



*Fuente: Elaboración propia*

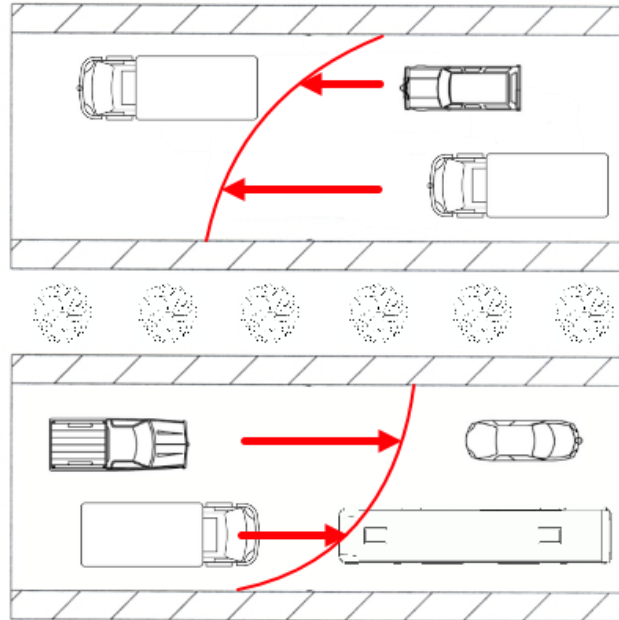
Figura 4 Perfil de velocidad en vías sin accesos en la margen izquierda



*Fuente: Elaboración propia*



Figura 5 Perfil de velocidad en vías “doble calzada”



*Fuente: Elaboración propia*

- Distribución direccional de los vehículos: en días hábiles, es decir, entre semana, el flujo vehicular presenta dos picos; en la mañana los mayores flujos se presentan desde la periferia de las ciudades hacia el centro de las mismas, y en la tarde el flujo es mayor en dirección inversa. De igual forma los fines de semana tienen un comportamiento bipolar; los viernes y los sábados los vehículos salen de la ciudad en dirección a centros de entretenimiento y descanso, y el regreso de esos mismos vehículos se presenta los domingos en la tarde. Por otro lado, las arterias urbanas y sub-urbanas que conectan grandes polos atractores, no se presentan alteraciones considerables al comparar el histograma de volúmenes vehiculares de las dos direcciones de la vía.
- Composición vehicular: este parámetro se presenta en términos de porcentaje sobre el volumen total de la vía. Resulta útil conocer la variación del volumen por tipo de vehículo

para otras disciplinas, por ejemplo para los diseñadores de pavimentos es fundamental conocer la magnitud de vehículos pesados que transita o transitará por una vía por diseñar.

- Hora de máxima demanda: a lo largo de las 24 horas del día, el flujo vehicular cuenta con variaciones en su magnitud, tanto en vías urbanas como en vías rurales. En las vías urbanas el máximo flujo se presenta en los periodos pico; los 60 minutos consecutivos con el máximo número de vehículos corresponde a la Hora de Máxima Demanda. Este parámetro caracteriza el tráfico de un punto en particular, de tal forma que su evaluación garantiza ser la situación más desfavorable, de la infraestructura que se pretenderá evaluar.

### **3.3.2. Velocidad**

La velocidad, como parámetro físico, es la relación de la longitud recorrida por un objeto, entre el tiempo que le llevo hacer dicha maniobra. En Ingeniería de Tránsito se manejan diferentes definiciones para la velocidad, en función de lo que se pretenda describir:

- Velocidad instantánea: corresponde a la velocidad de un vehículo en un particular instante de tiempo.
- Velocidad puntual: corresponde a la velocidad instantánea de un vehículo en un particular punto.
- Velocidad de recorrido: resulta de la relación entra la distancia recorrida por un vehículo y el tiempo que tardó en hacer la acción.
- Velocidad de marcha: es la relación entre la distancia recorrida por un vehículo y el tiempo que tardó en hacerlo, descontándole el tiempo que haya estado en reposo el vehículo.
- Velocidad libre: es la velocidad puntual que un vehículo desarrolla sin la interferencia de otros vehículos.

### **3.3.3. Densidad**

También conocida como “ocupación vial”, corresponde al número de vehículos que se encuentran en un instante de tiempo particular, y espacialmente en un tramo de vía, calzada o carril; generalmente se expresa como número de vehículos por kilómetro.

## **3.4. CONGESTIÓN**

Técnicamente, la congestión se presenta cuando el volumen de demanda excede la capacidad de la vía en un punto en particular; aunque para el ciudadano común una vía esta congestionada cuando los usuarios de ella no pueden circular cómodamente y tienen demoras excesivas.

### **3.4.1. Congestión relacionada con incidentes viales**

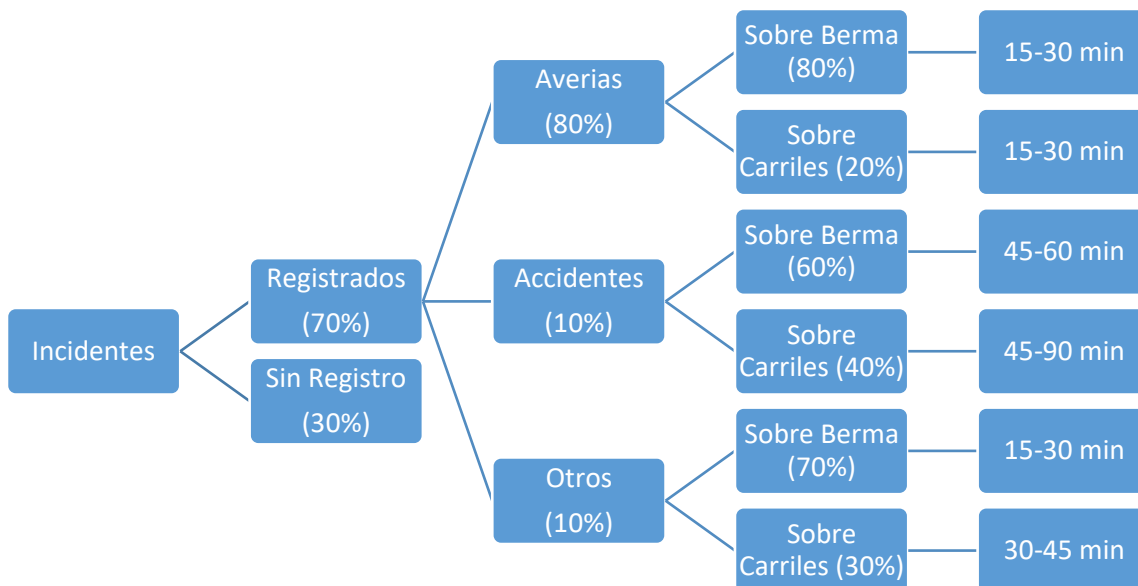
Las demoras relacionadas con los incidentes viales se deben a la reducción de la capacidad de la vía donde ocurre el incidente. De acuerdo con el Manual de Ingeniería de Tránsito (Kutz, 2011), los incidentes viales incurren desde el cierre de la berma (vías nacionales), hasta el cierre total de la calzada. En la Figura 6 se muestran los tipos de incidentes acontecidos en autopistas de los Estados Unidos, relacionando el lugar de la calzada donde se presenta el cierre, así como la duración del mismo.

La Figura 7 es la representación gráfica del comportamiento del tráfico, aguas arriba y aguas abajo de un incidente vial. Aguas arriba del lugar del incidente, las características de tráfico exhiben velocidades y densidad normal. En la zona inmediatamente aguas arriba del lugar del incidente se caracteriza por altas densidades, representadas en bajas velocidades de circulación y formación de colas vehiculares. Por el contrario, el área inmediatamente aguas abajo del incidente, presenta velocidades ligeramente más altas de las normales para el sector. Finalmente, aguas abajo del lugar del incidente, el flujo recupera sus características típicas, normalizándose la densidad de

flujo y la velocidad. La longitud de la zona de congestión está directamente relacionada con la gravedad del incidente, y del número de carriles ocupados por el mismo.

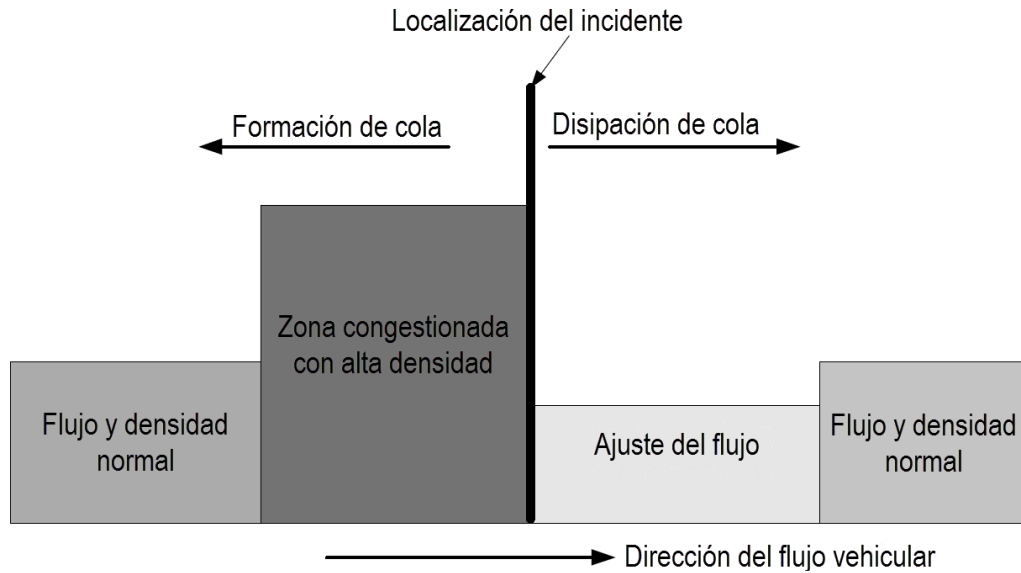
Por otro lado, en la Figura 8 se ilustran las demoras generadas por un incidente, representado por las llegadas y salidas acumuladas, a lo largo de la duración de un incidente. Mientras que en la Figura 9 se exponen las potenciales reducciones de las demoras, y del tiempo del incidente, después de dar inicio a un programa de gestión de tráfico; en primera instancia se muestra la reducción tras la implementación de un desvío por una ruta alterna; el segundo caso corresponde a la implementación de cierres viales con transiciones, cuya función es canalizar y organizar el flujo aguas arriba del incidente.

Figura 6 Tipos de incidentes



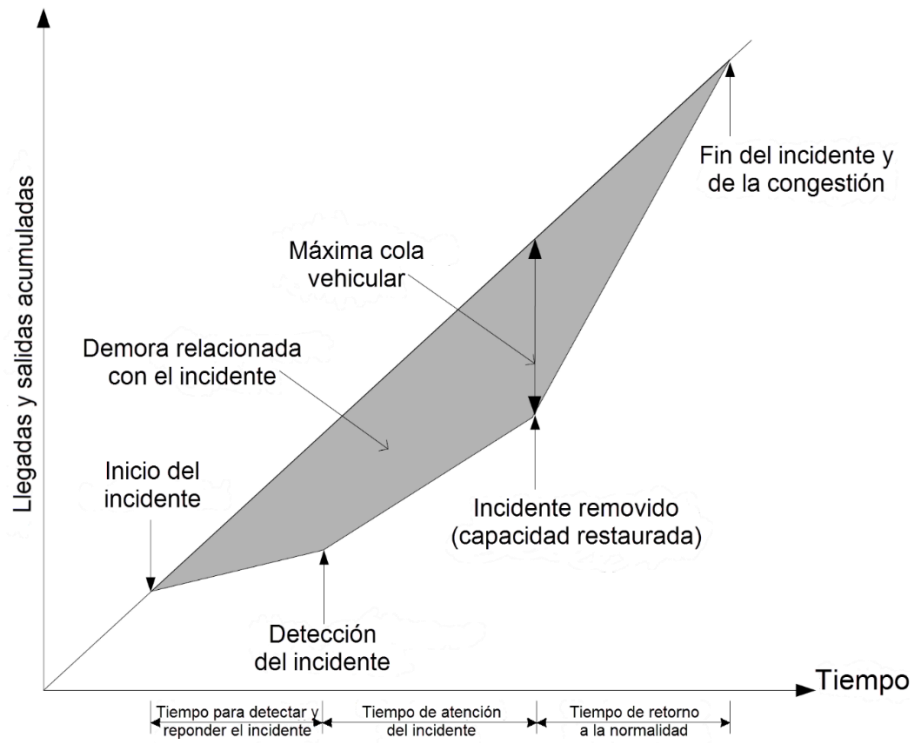
Fuente: (Kutz, 2011)

Figura 7 Comportamiento del tráfico bajo un incidente



Fuente: (Kutz, 2011)

Figura 8 Demoras y colas resultantes de un incidente



Fuente: (Kutz, 2011)

### **3.4.2. Cuello de botella**

En vías con flujo continuo, los cuellos de botella se generan en tramos donde la sección transversal reduce su ancho, disminuyendo el número de carriles. Esta situación donde la demanda de llegada, es decir, el volumen vehicular al inicio del cuello de botella, supera la capacidad de salida, presentándose problemas de congestión representada en la formación de colas y en generación de demoras vehiculares.

### **3.5. PTV-VISSIM**

PTV-VISSIM es un programa de simulación microscópica basado en modelos de comportamiento vehicular, cuya finalidad es representar el comportamiento de los vehículos automotores, bicicletas y peatones, bajo condiciones específicas como los carriles, de una vía, la composición vehicular del flujo, la programación de semáforos, entre otros.

La primera versión del programa fue desarrollada por la Universidad de Karlsruhe, en Alemania, en la década de los 70 del siglo pasado. Durante un par de décadas fue una herramienta meramente académica, hasta que en el año 1993 la empresa PTV-Group desarrollo y comercializo una versión para uso masivo. La versión que se utilizará en el presente estudio corresponde a la 9.0.

El programa de micro-simulación PTV-VISSIM representa el comportamiento vehicular dentro de un sistema vial a nivel individual, es decir, analiza cada maniobra realizada por el vehículo dentro de la red construida.

Figura 9 Potencial reducción de las demoras y colas con programa de gestión de tráfico

a. Uso de ruta alterna



b. Uso de cierres con transición



Fuente: (Kutz, 2011)

El refinamiento del programa resulta en la incorporación de los modelos de comportamiento vehicular (Saniger, 2013):

- Modelo de seguimiento vehicular:
- Modelo de cambios de carril
- Modelo de comportamiento lateral
- Modelo de reacción a la luz amarilla

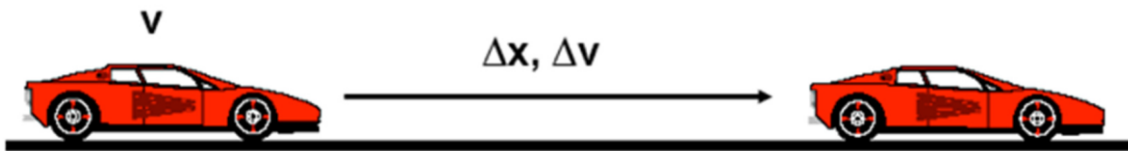
### **3.5.1. Modelo de seguimiento**

El primero de ellos resulta ser el de mayor trascendencia para el programa; el modelo se basa en el concepto que un conductor desacelera cuando se acerca a un vehículo más lento, debido a la percepción de sobrepaso del umbral de seguridad; además, el modelo considera que el conductor no determina la velocidad exacta del vehículo que lo precede, y por lo tanto tampoco la distancia entre los vehículos. Así las cosas, cuando un vehículo se encuentra en seguimiento de otro Figura 10, se genera un proceso cíclico de aceleración y desaceleración, de tal forma que la distancia que separa los dos vehículos oscilará en un valor medio, que corresponde a la distancia de seguridad deseada por el conductor del vehículo de atrás. Este proceso se representa en la Figura 11. El eje de las abscisas representa el residuo entre los vehículos, y las ordenadas representan la distancia entre ellos. La flecha representa el comportamiento del vehículo de atrás, en un principio (zona verde) el conductor no percibe al vehículo de adelante, por lo tanto se mueve a flujo libre. Si la velocidad del vehículo de atrás es superior a la de adelante, la distancia entre los dos decrece hasta el momento en que el conductor del vehículo de atrás percibe al vehículo de adelante, por ende modifica su forma de conducir.



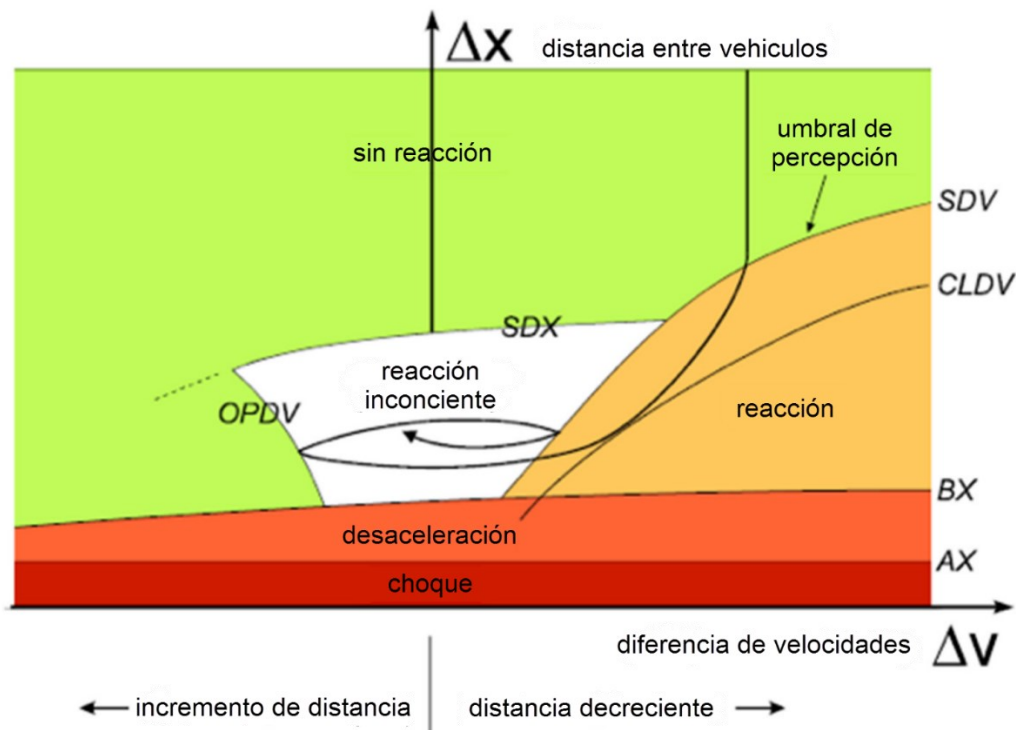
En la zona naranja, el vehículo de atrás reduce su velocidad, al igual que la distancia entre los vehículos. La maniobra del conductor de atrás logra que en un instante de tiempo se iguale la velocidad de los vehículos, generando una distancia entre ellos constante. Cuando el vehículo de atrás entra en la zona blanca, se presenta el proceso cíclico de aceleración y desaceleración, ya que el conductor no tiene el control absoluto de las variables respecto al vehículo de adelante.

Figura 10 Vehículo en seguimiento



Fuente: (Saniger, 2013)

Figura 11 Modelo de seguimiento



Fuente: (Saniger, 2013)

Donde:

- AX: distancia estacionaria
- BX: distancia mínima de seguimiento
- CLDV: umbral de percepción (cerca): velocidad superior al vehículo precedente
- SDV: umbral de percepción (lejos): velocidad superior al vehículo precedente
- OPDV: umbral de percepción: velocidad inferior al vehículo precedente
- SDX: umbral de percepción: aceleración libre

### **3.5.2. Modelo de cambio de carril**

Por otro lado, el modelo de cambio de carril parte de dos tipos, el libre y el necesario. Cambiar libremente de un carril a otro se presenta cuando el conductor de un vehículo decide cambiar a otro carril porque allí encuentra mayor espacio y puede desarrollar mayor velocidad. La necesidad de cambiar de carril surge cuando un vehículo necesita girar en una intersección o tomar una rampa de salida, y no se encuentra en el carril adecuado para hacerlo.

En ambos casos el conductor debe evaluar la distancia de su vehículo respecto al de atrás y que se encuentra en el carril de cambio. Por lo tanto, este modelo contiene parámetros de desaceleración máxima para los dos vehículos involucrados en la maniobra, y que la misma se realice de forma segura.

De igual forma, el modelo se calibra con parámetros como la distancia de seguridad entre vehículos, así como un factor de cooperativismo relacionado con fenómenos de cooperación en zonas de entrecruzamiento Figura 12.

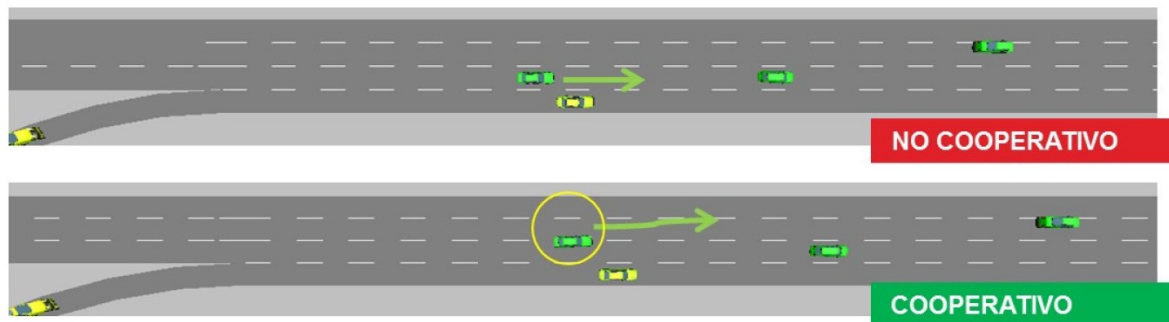
### 3.5.3. Modelo de comportamiento lateral

El modelo de comportamiento lateral se involucra cuando se simulan bicicletas y motocicletas que pueden adelantar otros vehículos dentro de un mismo carril. Esta situación también puede ser simulada con otros vehículos, siempre y cuando haya el espacio necesario, es decir, los carriles sean lo suficientemente anchos.

### 3.5.4. Modelo de reacción a la luz amarilla

La reacción a la luz amarilla se utiliza cuando la simulación involucra controles semafóricos. Este parámetro tiene impacto en la capacidad de las intersecciones semaforizadas, sin embargo, dicho impacto suele ser marginal.

Figura 12 Cambio de carril cooperativo



*Fuente: (Saniger, 2013)*

Adicionalmente a los modelos de comportamiento en los cuales se base el software, también presenta opciones de ajuste de los mismos, los cuales permiten adecuar el comportamiento de los conductores dentro del modelo a las características particulares de un sector, localidad o vía. Por ejemplo, particularidades como el comportamiento de los motociclistas, es decir, su ubicación dentro del carril y las distancias que guardan frente a otros vehículos; este tipo de características se calibran dentro del modelo con el fin que el mismo sea lo más representativo de la realidad.

Teniendo en cuenta lo anterior, la SDM suministra una plantilla que contiene dichos comportamientos a los consultores de tránsito, y cabe destacar que el presente estudio se elaboró con una de esas planillas.

Figura 13 Configuración del comportamiento

Driving Behaviors (2)															
Select layout... <Single List>															
Count	No	Name	ObsrvdVehs	StandDistIsFix	StandDist	CarFollowModType	W74bxAdd	W74bxMult	LnChgRule	AdvMerg	DesLatPos	OvtLDef	OvtRDef	LatDistDrivDef	LatDistStandDef
1	1	Urban (motorized)	6	<input type="checkbox"/>	0,50	Wiedemann 74	1,00	1,50	Free lane selection	<input checked="" type="checkbox"/>	Middle of lane	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,30	0,10
2	2	Right-side rule (motorized)	4	<input type="checkbox"/>	0,50	Wiedemann 99	2,00	3,00	Slow lane rule	<input checked="" type="checkbox"/>	Middle of lane	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1,00	0,20
3	3	Freeway (free lane selection)	4	<input type="checkbox"/>	0,50	Wiedemann 99	2,00	3,00	Free lane selection	<input checked="" type="checkbox"/>	Middle of lane	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1,00	0,20
4	4	Footpath (no interaction)	4	<input type="checkbox"/>	0,50	No interaction	2,00	3,00	Free lane selection	<input checked="" type="checkbox"/>	Any	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1,00	0,20
5	5	Cycle-Track (free overtaking)	4	<input type="checkbox"/>	0,50	Wiedemann 99	2,00	3,00	Free lane selection	<input checked="" type="checkbox"/>	Right	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,30	0,10
6	6	Urban (Motocicletas)	4	<input type="checkbox"/>	0,50	Wiedemann 74	1,00	1,50	Free lane selection	<input checked="" type="checkbox"/>	Any	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,30	0,05
7	7	Urban (Doble Fila)	6	<input type="checkbox"/>	0,50	Wiedemann 74	1,00	1,50	Free lane selection	<input checked="" type="checkbox"/>	Any	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0,30	0,05

Fuente: PTV-VISSIM

#### 4. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

En torno al análisis de las colas generadas por la accidentalidad en vías urbanas, el círculo de investigadores en tránsito no ha emitido conceptos, ni a nivel local, ni a nivel internacional. Se realizó la consulta de las diferentes fuentes bibliográficas proporcionadas por la biblioteca de la UAN, sin embargo no se encontró análisis alguno al respecto.

Por otra parte lo que si se ha desarrollado son una serie de manuales que le dictan a las autoridades de tráfico en Norteamérica, como deben atenderse los incidentes en vías intermunicipales o interestatales, por ejemplo el Departamento de Transporte de los Estados Unidos, más exactamente la Administración de Autopistas Federales, desarrollo un Manual para el Manejo de Incidente de Tráfico (Federal Highway Administration, 2010), igualmente, en la Provincia de Nueva Escocia en Canadá, implemento desde el 2009 una Guía para el Manejo de Emergencias de Tráfico (State of New Jersey, 2010), estos al igual que varios más, son manuales enfocados a vías de alta velocidad y que dadas sus características geométricas manejan volúmenes vehiculares inferiores a los de una vía urbana.

Como ya se ha comentado, lo más cercano al presente estudio, es el análisis de las consecuencias sobre el tránsito cuando un flujo vehicular llega a una reducción de calzada (Espindola, 1994), al igual que en el HCM se hace mención de los cuellos de botella o “bottleneck”, término en inglés, (Transportation Research Board, 2010).

Por otra parte, la sociedad ingenieril especialista en tránsito y transporte, para la evaluación de redes viales, se ha valido de software de simulación microscópica con el fin de simular las interacciones entre los actores de la movilidad (vehículos, bicicletas y peatones), y posteriormente, determinar impactos de infraestructura nueva, o existente, o de comportamiento particular de uno

o varios actores viales. Estos programas de computadora son ampliamente reconocidos y sus resultados son aceptados por la comunidad académica al igual que de entes reguladores de la movilidad, por ejemplo la SDM.

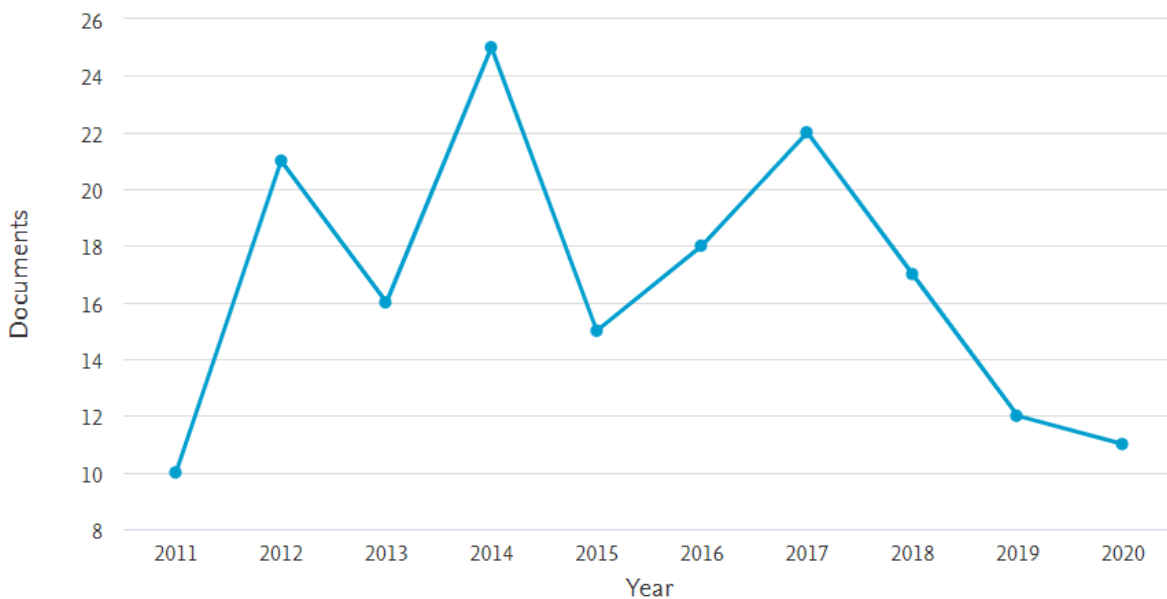
Con el fin de complementar la búsqueda de productos de investigación que se ha público respecto al tema tratado en el presente estudio, se realizó la consulta en la página web Scopus (Elsevier, 2020), reconocida base de datos bibliográficos, de citas y artículos de revistas científicas. Como se observa en la Tabla 1, se hicieron dos (2) búsquedas, ambas se realizaron con palabras claves en inglés para contar con un mayor volumen de información.

Tabla 1 Parámetros de búsqueda

BUSQUEDA	PALABRAS CLAVE	PERIODO DE PUBLICACIÓN	# DE DOCUMENTOS
1	transportation – engineering – incident – management	2011-2020	167
2	incident – management – simulation – transportation – engineering	2011-2020	25

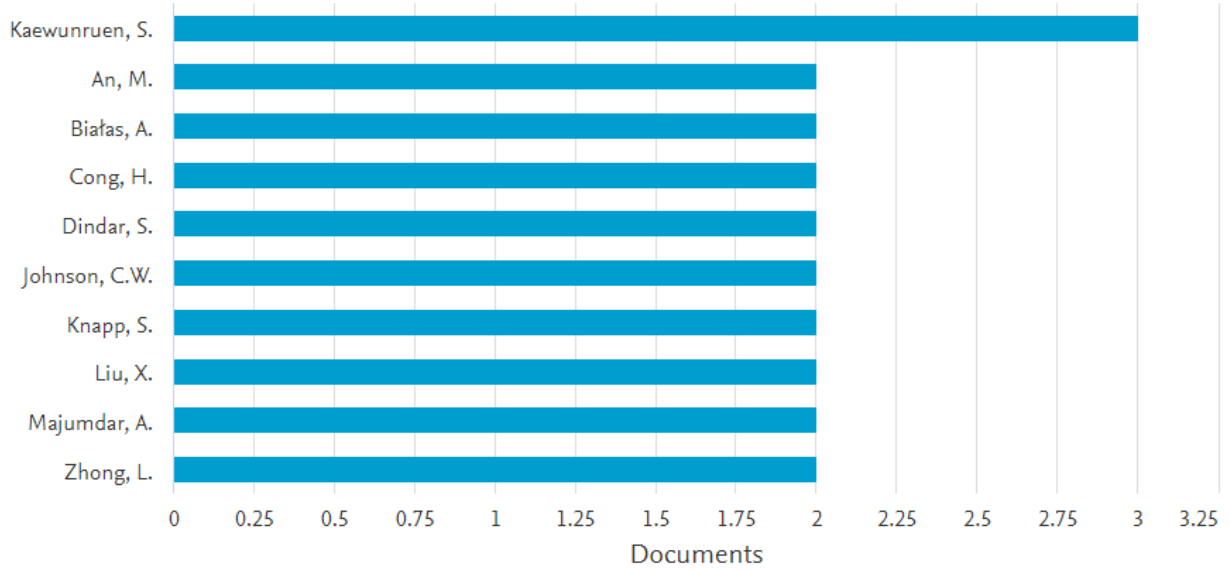
*Fuente: elaboración propia*

Gráfica 1 Documentos por año – Búsqueda 1



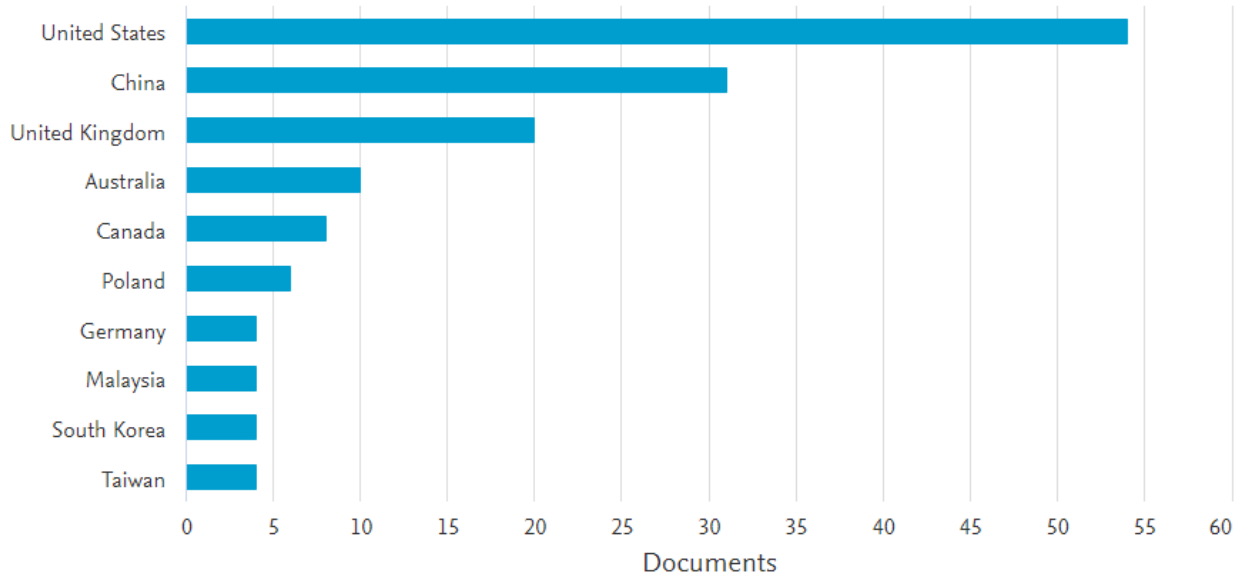
*Fuente: (Elsevier, 2020)*

Gráfica 2 Publicaciones por autor – Búsqueda 1



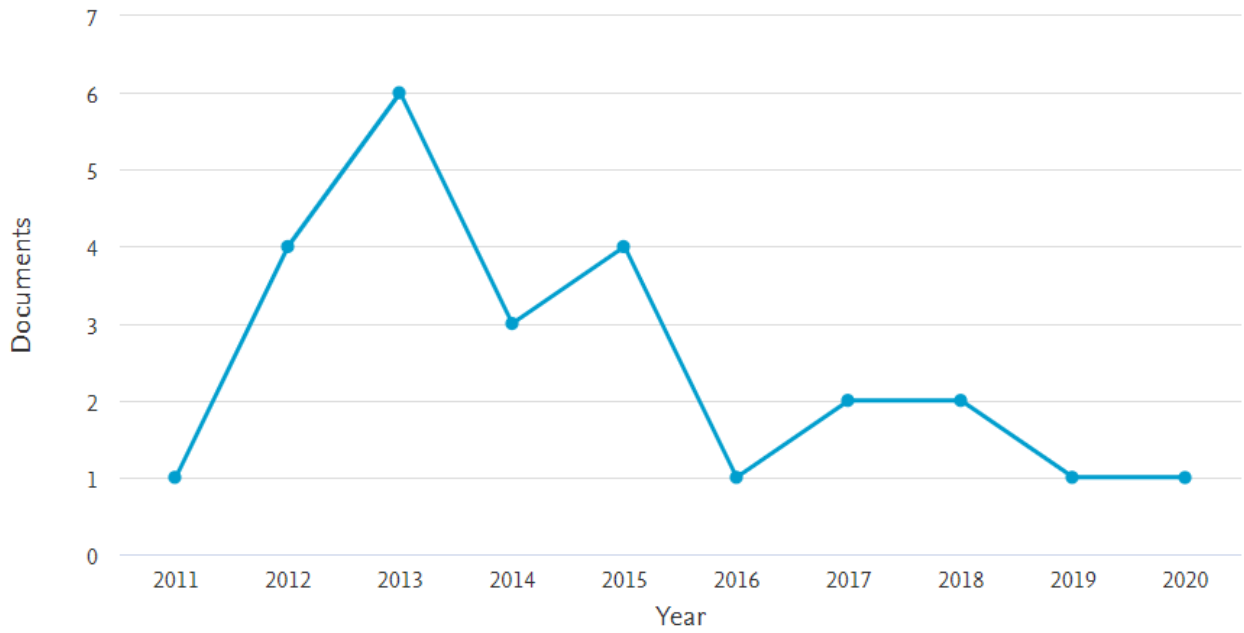
*Fuente: (Elsevier, 2020)*

Gráfica 3 Publicaciones por país – Búsqueda 1



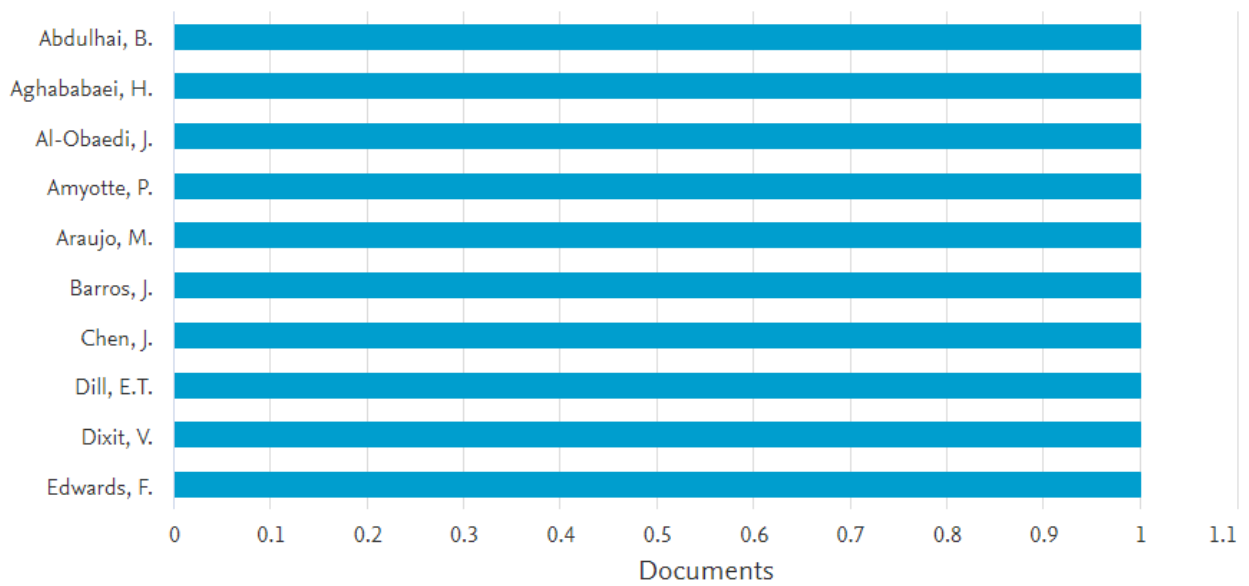
*Fuente: (Elsevier, 2020)*

Gráfica 4 Documentos por año – Búsqueda 2



*Fuente: (Elsevier, 2020)*

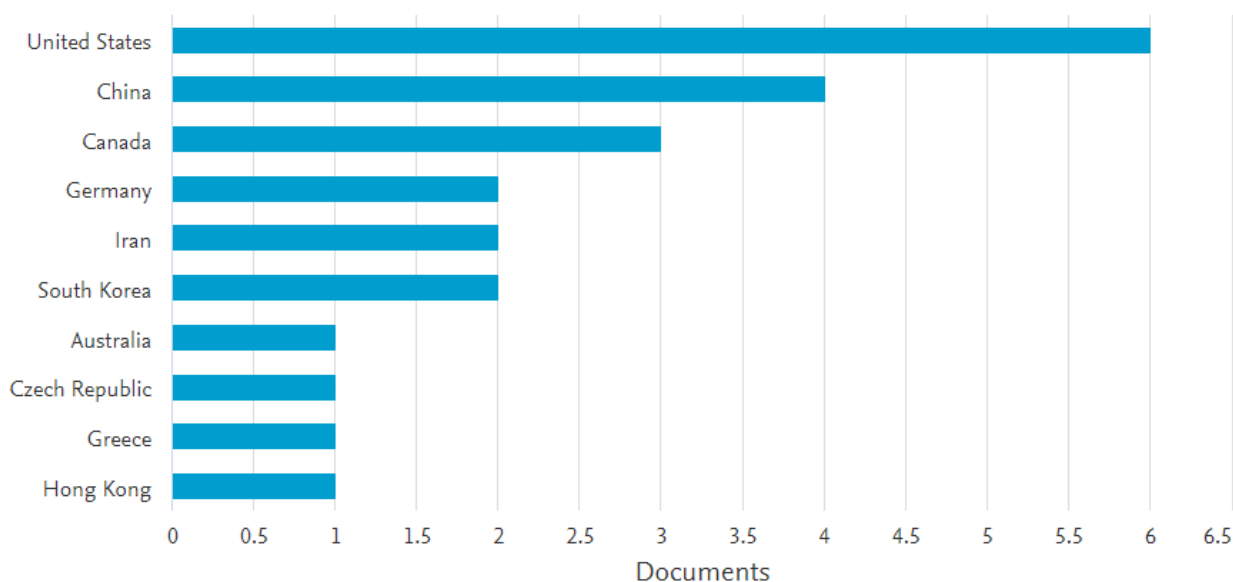
Gráfica 5 Publicaciones por autor – Búsqueda 2



*Fuente: (Elsevier, 2020)*



Gráfica 6 Publicaciones por país – Búsqueda 2



*Fuente: (Elsevier, 2020)*

Dentro de los artículos consultados en la página web de Scopus (Elsevier, 2020), se destacan los siguientes:

A la luz del simposio de ciudades inteligentes realizado en Praga, Republica Checa, el Departamento de Transporte de la Universidad Técnica Checa expuso su investigación sobre las posibilidades de implementar un sistema de dirección de incidentes en ciudades, basado en tecnologías existentes, como la red semafórica. Esta investigación fue promovida por el Plan de Desarrollo de Sistemas de Transporte Inteligente del gobierno checo (Ruzicka, 2020).

La Universidad de Carolina del Norte, en Estados Unidos, adelanto una investigación enfocándose sobre los efectos de la construcción de nueva infraestructura vial en la conexión de una autopista con una zona residencial, específicamente en los tiempos de viaje empleados por los usuarios habituales de la vía, así como las demoras generadas durante el tiempo de obra (Kukkapalli, 2019).

En la Universidad Chang'an, en Xian, China, realizaron un estudio sobre el efecto de las demoras generadas por incidentes viales sobre el tiempo de viaje de los vehículos. La investigación partió de los tiempos de viaje típicos de un tramo de autopista, de tal forma que el modelo de partida estaba calibrado. La información de entrada al modelo fueron volúmenes vehiculares, tiempos de viaje y velocidades. La experimentación consistió en la variación de cierres parciales del tramo de autopista, modificando la longitud y sección transversal ocupada por el incidente. La finalidad del estudio fue contribuir en la mejora de los tiempos de atención de incidentes en las carreteras públicas de China (Ru, 2019).

La Universidad Nacional de Colombia en asocio con la Universidad de Wisconsin, realizó un estudio sobre el costo-beneficio de implementar una patrulla de control de tráfico para la atención de congestiones no frecuentes (incidentes viales) y su impacto. El estudio consistió en extrapolar un programa de patrullas de control de tráfico implementado en el estado de Wisconsin, a las carreteras en Colombia. Esta investigación fue presentada en una conferencia de movilidad urbana para ciudades inteligentes en Medellín en el año 2018 (Reyes, 2018).

En la Universidad Beijing Jiaotong, China, desarrollo un modelo que representa las características espaciales y temporales de la velocidad de un flujo que se somete a la presencia de un incidente vial. El modelo simula cuantitativamente la magnitud de la velocidad del flujo vehicular aguas arriba y aguas abajo del incidente, de tal forma que predice el límite y el tiempo de congestión (Zang, 2017).

En la Universidad Hanyang, en Corea del Sur, en el año 2017, se desarrolló un estudio enfocado en la aplicación de sistemas de seguridad para los vehículos, con el fin de analizar la automatización de los vehículos en un segundo nivel, es decir, sistemas de alarma ante la presencia de potenciales accidentes. Este análisis partió de la determinación de las trayectorias vehiculares

en un tramo de vía, las cuales se simularon en Vissim. Posteriormente, se condiciono el modelo a un comportamiento que simulara la existencia de alarmas sobre potenciales riesgos en la vía, y como resultado se obtuvieron reducciones en las demoras vehiculares y reducción de las trayectorias conflictivas (Jeong, 2017).

La Universidad George Washington, de los Estados Unidos, debido a las demoras generadas por la congestión vehicular que se presentan en algunas de las vías del estado de Virginia, inicio un estudio sobre la gestión de incidentes adelantada por el Departamento de Transporte del Estado de Virginia, específicamente sobre la implementación de una Patrulla de Seguridad. La efectividad de esta patrulla en la reducción del tiempo de congestión, derivada de un incidente vial, fue objeto para el desarrollo de un modelo probabilístico que simula diferentes factores de la movilidad y que se puede usar como base para la ampliación del programa de la Patrulla de Seguridad (Yip, 2016).

La administración del tráfico en la ciudad de Shanghai, en China, cuenta con un centro de gestión del tráfico, en el cual monitorean la red vial urbana de ciudad con ayuda de una red de video cámaras. El constante monitoreo, así como la experiencia ganada en la gestión de incidentes viales, llevo al Centro de Monitoreo a desarrollar un modelo que simula el comportamiento de la velocidad aguas arriba, y debajo de un incidente. Con el fin de estudiar la validez de dicho modelo, la Universidad de Tongji, mediante la utilización de AIMSUM<sup>1</sup>, compararon los resultados del modelo desarrollado por el Centro de Monitoreo; concluyeron que el modelo es certero para periodos de estudio cortos y en condiciones de tráfico de alta densidad (Xie, 2015).

---

<sup>1</sup> Software de modelación de tránsito, para la validación de algoritmos de planificación de rutas para vehículos autónomos.



## 5. FORMULACIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La Secretaría Distrital de Movilidad (SDM), como cabeza y autoridad del tránsito y del transporte en Bogotá, en los últimos años ha adelantado estudios en miras de identificar todas las variables que inciden en la movilidad de la ciudad. Dentro de los estudios hechos se determinó que para el 2011 el tiempo promedio de viaje que empleaba una persona para asistir a sus actividades cotidianas variaba entre 40 y 77 minutos (Secretaría Distrital de Movilidad-SDM, 2011), correspondiendo el más bajo al estrato 6 y el más alto al estrato 1. Igualmente, el Departamento Nacional de Planeación (DPN) determinó que para el 2014 un bogotano en promedio empleaba 67 minutos diarios en desplazamientos cotidianos (Departamento Nacional de Planeación-DPN, 2016). En este mismo estudio el DNP concluyó que en Bogotá se pierden anualmente 7 millones de horas-trabajo-hombre, muy por encima del promedio nacional que es de 4 millones.

Los tiempos de viaje están íntimamente relacionados con el volumen y la capacidad vehicular de las vías. El evidente crecimiento del parque automotor de la ciudad (autos y motocicletas particulares) (Observatorio Ambiental de Bogotá, 2016), es uno de los factores que lleva al aumento del tiempo de viaje de los bogotanos. A la par, el desbordado crecimiento del número de motocicletas que circulan en la ciudad, ha incrementado la accidentalidad para este actor vial (Diario el Tiempo, 2016), y como consecuencia se ven afectados los tiempos de viaje.

Por otra parte, la Policía Nacional no cuenta con ningún Plan para la atención de accidentes (Policía Nacional de Colombia, 2016). La SDM tampoco cuenta con un documento que dirija a los agentes de tránsito ante un accidente en las vías de la ciudad; lo más parecido que se tiene es la Cartilla de Planes de Manejo de Tránsito para Vías Locales. Dicha cartilla se emplea para la ejecución de obras, y les indica a los constructores como minimizar el impacto de sus obras sobre la movilidad en el sector donde se ubica el proyecto.

Ante el evidente crecimiento del parque automotor, el aumento de la accidentalidad y la inexistencia de políticas para atender eficientemente los accidentes de tránsito, surge la necesidad de buscar alternativas que alivien el impacto de la accidentalidad sobre la movilidad. Teniendo en cuenta que las vías de mayor importancia para la ciudad son aquellas por donde circula el Transmilenio (Vías Troncales), se buscarán alternativas de canalización para mitigar el impacto de un accidente en función del número de carriles que componen la calzada, así como del número de líneas ocupadas por el incidente en este tipo de vías.

La Avenida Carrera 30 cuenta con las características descritas anteriormente. Como uno de los corredores principales de la ciudad, hace parte de la Malla Vial Arterial Principal (Alcalde Mayor de Bogotá, 22 de Junio de 2004) y conforma, junto con otras vías, el Subsistema del Centro Tradicional y de la Ciudad Central (Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, 2005). La calzada sentido sur-norte de la Avenida Carrera 30, entre la Calle 53B Bis y la Calle 62, está conformada por cuatro carriles para el tráfico mixto (autos, buses, camiones y motocicletas); esta característica permite evaluar múltiples posibilidades frente al carril o carriles ocupados por un accidente.

Con la selección de este tramo vial se busca particularizar el problema de tal forma que este documento sirva como base para replicar el análisis en otras tipologías de vías de la capital.

Entonces, ante el crecimiento del parque automotor, complementado por el rezago de la infraestructura vial de la ciudad (Publicaciones Semana S.A., 2014), ha aumentado la congestión vial. La congestión tiene como resultado mayores tiempos de viaje; estos tiempos se incrementan ante la existencia de un accidente. Y ya que las autoridades policivas dentro de su protocolo de atención de accidentes no cuentan con un direccionamiento explícito que mitigue el impacto de los siniestros viales sobre la movilidad, surge el cuestionamiento de ¿Cómo las autoridades policivas deben cerrar la calzada sur-norte de la Carrera 30 entre Calle 53B y Calle 63 ante la

eventualidad de un accidente de tránsito para generar el menor impacto posible sobre la movilidad del sector?; eso es lo que se tratará de responder mediante la elaboración del presente documento.

Las razones para llevar a cabo el estudio en la Carrera 30 entre Calle 53B y Calle 63 se condensan a continuación:

- La homogeneidad de la sección transversal de la vía. La Carrera 30, específicamente la calzada sur-norte, en este sector de la ciudad, tiene cuatro carriles destinados para el tráfico, los cuales mantienen su ancho a lo largo del tramo seleccionado.
- Poco tráfico de ingreso y salida. En este tramo de la Carrera 30, las vías que salen o ingresan a la avenida representan un tráfico despreciable respecto al volumen vehicular que circula sobre la Carrera 30, es decir, el flujo vehicular es constante a lo largo de la vía en este sector.
- Facilidad para consecución de información secundaria. Dado que esta vía es considerada una de las arterias principales de conexión dentro de la ciudad, la Secretaría Distrital de Movilidad cuenta con un programa de seguimiento a dicha vía, por tal motivo, y tras una solicitud formal, la SDM brindó la información necesaria para caracterizar el tráfico en el sector de estudio.

Por otro lado, se cuenta con la información de siniestralidad de la calzada sur-norte de la Carrera 30 entre Calle 53B y Calle 63, para el periodo de tiempo comprendido entre el año 2015 y el año 2019. De acuerdo con lo suministrado por la SDM (Secretaría Distrital de Movilidad-SDM, 2020), entre el año 2015 y 2019 se han presentado 79 siniestros, de los cuales el 76% corresponden a Solo Daños, el 20% a siniestros con heridos y el restante 4% a siniestros donde hubo muertos. Respecto a la evolución de la siniestralidad en el tiempo, se establece que en el sector de estudio ha habido un descenso de la siniestralidad, con una tendencia a la baja, destacándose la NO presencia de accidentes que como resultado tengan personas fallecidas desde el año 2017.

Tabla 2 Siniestralidad AK 30 entre CL 53B y CL 63

GRAVEDAD	AÑO					TOTAL
	2015	2016	2017	2018	2019	
Con heridos	6	3	3	1	3	16
Con muertos	1	2				3
Solo daños	21	14	13	4	8	60
<b>TOTAL</b>	<b>28</b>	<b>19</b>	<b>16</b>	<b>5</b>	<b>11</b>	<b>79</b>

*Fuente elaboración propia*

## 5.1. JUSTIFICACIÓN

Dado el creciente número de accidentes de tránsito de la ciudad, asociado al acelerado crecimiento del parque automotor, resulta importante encontrar alternativas para reducir el impacto de dicha accidentalidad en la movilidad del Distrito Capital.

Dentro de las posibles alterativas se podría generar un documento donde se tipifiquen las vías troncales de la ciudad, y en función al número de carriles de estas, así como del número de carriles ocupados por el accidente, se generen cierres típicos que minimicen las demoras de los vehículos represados por el accidente. En principio se podrían utilizar las medidas de los cierres empleados en obras; la orientación para la implementación de cierres relacionados con obra se encuentra en el Manual de Señalización Vial (Ministerio de Transporte, 2015) y en la SDM (Secretaría Distrital de Movilidad-SDM, 2009). Una vez se cuente con dichas medidas, mediante la utilización de un software especializado, se entrará a evaluar y se determinará cuál de las alternativas es la que mejor se ajusta.

La obtención de este documento buscará la disminución de tiempo en cola de los vehículos represados por el accidente, así como la facilidad en la atención del accidente por parte de la autoridad policiva. Teniendo en cuenta el estudio hecho por el DNP (Departamento Nacional de Planeación-DPN, 2016), cualquier tiempo que se ahorre un bogotano se traduce en dinero que se



ahorra, o en tiempo para emplear en cualquier otra actividad, bien sea que le genere un ingreso o una satisfacción.

## **5.2. PERTINENCIA SOCIAL**

El DNP dentro de su análisis también pudo determinar que el 2% del PIB se pierden en trancones (Departamento Nacional de Planeación-DPN, 2016), es decir, en promedio un colombiano pierde cerca de \$480.000<sup>2</sup> anualmente. Por tal razón, cualquier aporte en la mitigación del efecto en la accidentalidad, repercute en el bolsillo de cualquier bogotano que tenga que utilizar cotidianamente las vías de la ciudad. Igualmente tendrá un efecto positivo en la labor de los agentes de tránsito, ya que se le facilitaría la atención de los accidentes en vía pública.

---

<sup>2</sup> Para el año 2019, según estadísticas del Banco Mundial (Banco Mundial, 2020), a precios 2020, el PIB per cápita de Colombia fue de US\$6432.



## 6. METODOLOGÍA

### 6.1. CARACTERIZACIÓN DE TRÁFICO VEHICULAR

Dentro de las funciones de la Secretaría Distrital de Movilidad, establecidas en el Artículo 108 del Acuerdo 257 del Concejo de Distrital (Concejo de Bogotá D.C., 30 de Noviembre de 2006), se encuentra formular y orientar políticas enfocadas para la regulación y control de tránsito. Es por ello que la Entidad, periódicamente, saca a concurso público el monitoreo de intersecciones semaforizadas y de mayor importancia estratégica por su ubicación y magnitud de volúmenes vehiculares.

Teniendo en cuenta lo anterior, mediante oficio SDM-3182-17 (Díaz, 19 de Enero de 2017), se solicitó la información más reciente respecto a los vehículos que circulan por la Avenida Carrera 30 entre Avenida Calle 53 y Avenida Calle 63. A la petición la Secretaría Distrital de Movilidad, mediante oficio SDM-DSVCT-5255-17 (Secretaría Distrital de Movilidad, 30 de Enero de 2017), y por correo electrónico, dio entrega de conteos vehiculares realizados en la Avenida Carrera 30 con Avenida Calle 53, Calle 53B, Calle 53B Bis y Avenida Calle 63, información tomada en campo a la luz del Contrato 1453-2014 de la SDM con el Consorcio Movilidad Bogotá-2015 (Secretaría Distrital de Movilidad, 2014).

Ya que la información recibida corresponde a volúmenes vehiculares del año 2015, resulta indispensable extrapolar los vehículos al año 2020 y realizar la evaluación con volúmenes vehiculares actualizados. Para tal fin se emplearon las tasas de crecimiento de la Secretaría de Movilidad (Dirección de Seguridad Vial y Comportamiento del Tránsito-SDM, 2017); específicamente se utilizaron las tasas de crecimiento vehicular de la localidad de Teusaquillo, lugar geográfico donde se ubica el sitio de estudio. Es importante destacar que los buses no cuentan

con tasas de crecimiento debido a que la Secretaría Distrital de Movilidad considera que la flota de buses SITP y SITP provisional es constante en el tiempo.

Tabla 3 Tasas de crecimiento vehicular

LOCALIDAD	VEHICULO	PERIODO			
		2013-2017	2018-2022	2023-2027	2028-2033
Teusaquillo	Liviano	2,61%	2,32%	2,11%	1,95%
	Carga	3,91%	3,76%	3,07%	2,94%

*Fuente: (Dirección de Seguridad Vial y Comportamiento del Tránsito-SDM, 2017)*

Tanto en la Tabla 4, como en la Figura 14, se presenta el comportamiento, a lo largo de un día, del flujo vehicular, en periodos de una hora, de la Avenida Carrera 30 a la altura de la Avenida Calle 53 en sentido sur-norte; aunque en dicho punto la NQS se encuentra segregada en dos calzadas, ambos flujos se sumaron para presentarlos en el presente documento.

Los factores de equivalencia, que se utilizan para la determinación de la HMD, se determinaron teniendo en cuenta lo establecido por el Manual de Planeación (Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, 2005), así: Autos (1.0), Buses (2.0), Camiones (2.5) y Motos (0.5). Este valor de vehículo equivalente se utiliza para determinar la hora de máxima demanda; así las cosas, la HMD para el flujo sur-norte de la Avenida Carrera 30 se presenta entre las 07:00-08:00 horas en un día típico, es decir, en un día hábil entre semana.

Tabla 4 Volúmenes vehiculares horarios AK 30 x AC 53 sentido Sur-Norte – Año 2020

Hora		Autos	Buses	Camiones	Motos	Mixtos	Equivalentes
00:00	01:00	397	14	57	70	538	604
00:15	01:15	344	13	49	64	470	526
00:30	01:30	302	11	44	47	404	459
00:45	01:45	259	6	53	36	354	423
01:00	02:00	201	3	46	36	286	342
01:15	02:15	162	1	44	35	242	293
01:30	02:30	151	0	45	40	236	285
01:45	02:45	149	1	39	49	238	274
02:00	03:00	148	4	49	48	249	303
02:15	03:15	160	7	55	49	271	337
02:30	03:30	156	12	60	52	280	357

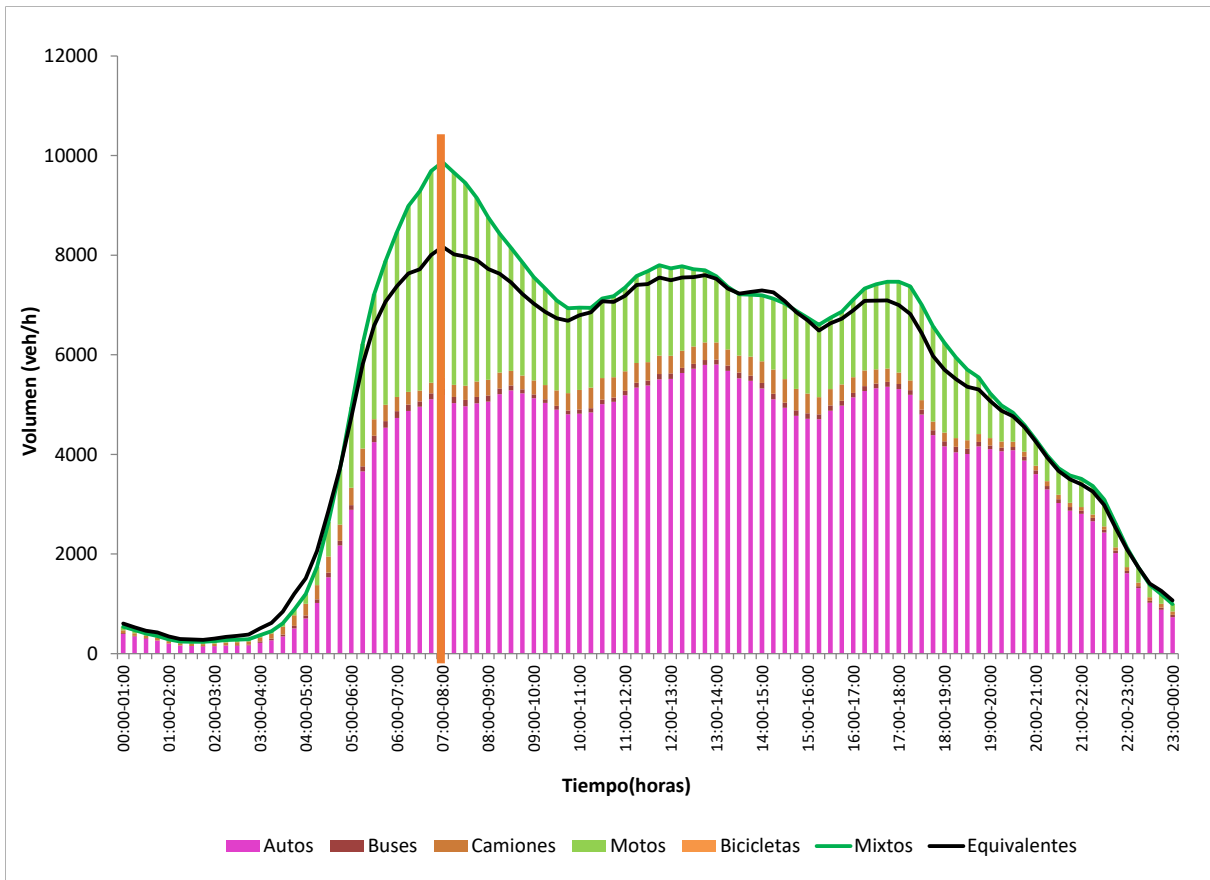
Hora		Autos	Buses	Camiones	Motos	Mixtos	Equivalentes
02:45	03:45	167	14	66	41	288	382
03:00	04:00	218	26	85	41	370	505
03:15	04:15	269	34	102	45	450	616
03:30	04:30	346	38	154	68	606	842
03:45	04:45	507	51	213	115	886	1200
04:00	05:00	708	57	235	197	1197	1509
04:15	05:15	1015	74	284	370	1743	2059
04:30	05:30	1534	92	322	691	2639	2870
04:45	05:45	2171	96	320	1112	3699	3720
05:00	06:00	2887	93	350	1615	4945	4756
05:15	06:15	3657	102	358	2100	6217	5807
05:30	06:30	4247	126	334	2509	7216	6589
05:45	06:45	4534	134	329	2889	7886	7070
06:00	07:00	4732	137	286	3306	8461	7375
06:15	07:15	4871	130	253	3733	8987	7631
06:30	07:30	4957	108	216	4006	9287	7717
06:45	07:45	5106	118	213	4252	9689	8001
07:00	08:00	5192	124	227	4325	9868	8171
07:15	08:15	5028	124	243	4260	9655	8014
07:30	08:30	4964	130	285	4073	9452	7974
07:45	08:45	5025	127	311	3685	9148	7900
08:00	09:00	5061	122	315	3259	8757	7723
08:15	09:15	5210	115	316	2794	8435	7628
08:30	09:30	5285	97	295	2471	8148	7453
08:45	09:45	5224	84	277	2268	7853	7220
09:00	10:00	5126	77	283	2074	7560	7026
09:15	10:15	5034	73	285	1938	7330	6863
09:30	10:30	4896	78	311	1808	7093	6735
09:45	10:45	4803	77	349	1704	6933	6683
10:00	11:00	4818	84	392	1651	6945	6793
10:15	11:15	4842	85	415	1602	6944	6852
10:30	11:30	5009	88	437	1595	7129	7076
10:45	11:45	5055	86	409	1625	7175	7063
11:00	12:00	5188	88	391	1686	7353	7185
11:15	12:15	5341	97	397	1748	7583	7402
11:30	12:30	5384	99	370	1824	7677	7420
11:45	12:45	5508	107	368	1815	7798	7550
12:00	13:00	5517	107	356	1753	7733	7498
12:15	13:15	5635	100	348	1695	7778	7553
12:30	13:30	5720	98	347	1554	7719	7561
12:45	13:45	5795	100	352	1449	7696	7600
13:00	14:00	5804	98	344	1330	7576	7526
13:15	14:15	5676	108	322	1260	7366	7328
13:30	14:30	5530	114	341	1231	7216	7227
13:45	14:45	5475	105	381	1247	7208	7262
14:00	15:00	5325	108	435	1324	7192	7291
14:15	15:15	5106	112	484	1424	7126	7253

Hora		Autos	Buses	Camiones	Motos	Mixtos	Equivalentes
14:30	15:30	4938	99	473	1522	7032	7080
14:45	15:45	4776	110	431	1564	6881	6856
15:00	16:00	4715	111	396	1522	6744	6689
15:15	16:15	4707	97	343	1453	6600	6486
15:30	16:30	4875	106	331	1430	6742	6631
15:45	16:45	4978	97	328	1461	6864	6724
16:00	17:00	5143	92	315	1555	7105	6893
16:15	17:15	5271	99	316	1643	7329	7081
16:30	17:30	5327	95	287	1704	7413	7087
16:45	17:45	5359	97	267	1741	7464	7092
17:00	18:00	5311	103	227	1823	7464	6997
17:15	18:15	5197	91	198	1887	7373	6819
17:30	18:30	4801	95	192	1913	7001	6429
17:45	18:45	4385	98	174	1915	6572	5975
18:00	19:00	4161	103	172	1803	6239	5700
18:15	19:15	4043	107	177	1617	5944	5509
18:30	19:30	4009	103	174	1417	5703	5359
18:45	19:45	4161	87	159	1140	5547	5303
19:00	20:00	4107	71	149	900	5227	5072
19:15	20:15	4061	75	122	723	4981	4878
19:30	20:30	4085	64	105	582	4836	4767
19:45	20:45	3877	74	101	538	4590	4547
20:00	21:00	3602	77	96	522	4297	4258
20:15	21:15	3295	68	100	518	3981	3941
20:30	21:30	3022	77	89	532	3720	3666
20:45	21:45	2872	69	85	550	3576	3499
21:00	22:00	2808	60	75	564	3507	3399
21:15	22:15	2659	66	70	568	3363	3252
21:30	22:30	2431	55	69	539	3094	2985
21:45	22:45	2017	50	67	479	2613	2526
22:00	23:00	1612	50	73	391	2126	2092
22:15	23:15	1316	36	75	307	1734	1731
22:30	23:30	1021	37	75	244	1377	1406
22:45	23:45	879	44	79	189	1191	1260
23:00	00:00	733	46	68	149	996	1070

*Fuente: Elaboración propia con base (Secretaría Distrital de Movilidad, 30 de Enero de 2017)*

La Figura 14 evidencia un pico pronunciado en el periodo de la mañana para el flujo vehicular de la Avenida Carrera 30, calzada oriental, con sentido de circulación sur-norte, entre las 06:00 y las 09:00 horas, con un máximo entre las 07:00-08:00 horas. Durante la tarde se presenta una “meseta” en el comportamiento del flujo, para finalmente, después de las 18:00 exhibir un descenso progresivo hasta las horas de la madrugada.

Figura 14 Histograma volúmenes vehiculares horarios AK 30 x AC 53 sentido Sur-Norte – Año 2020



*Fuente: Elaboración propia con base (Secretaría Distrital de Movilidad, 30 de Enero de 2017)*

Por otro lado, y con el fin de calibrar el modelo por velocidades, se realizó una toma de información el día miércoles 7 de febrero de 2018 entre 06:30 y 08:30 horas, que consistió en tomar tiempos de recorrido, por tipo de vehículo, por la calzada sur-norte de la Avenida Carrera 30 entre Calle 53B Bis y la Calle 60, utilizando el método del vehículo flotante.

El método de vehículo flotante consiste en tomar el tiempo entre dos puntos de referencia. Dicho tiempo se desde el interior de un vehículo que circula al interior del flujo a la misma velocidad de los vehículos que fluyen a su lado. Para evitar datos anómalos, se hace el registro de

tres tiempos diferentes. En la Tabla 5 se presentan las velocidades logradas en cada recorrido por tipo de vehículo, así como el promedio.

Tabla 5 Velocidades de recorrido AK 30 entre CL 53B Bis y CL 60

Tramos Aforados	Vehículo	# Registros	Vel 1 (Km/h)	Vel 2 (Km/h)	Vel 3 (Km/h)	Vel Prom (Km/h)
1: AK 30 entre CL 53B BIS & CL 60	Auto	3	45	33	40	39,33
	Bus	3	38	25	32	31,67
	Camión	3	39	29	37	35,00
	Moto	3	51	37	43	43,67
						<b>40,97</b>

*Fuente: Elaboración propia*

## 6.2. ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO

Con el propósito de analizar las condiciones de operación de la Avenida Carrera 30 entre la Calle 53 y la Calle 63, específicamente evaluando las variables imperantes del tráfico como son: demoras, colas y niveles de servicio, enfocándolas especialmente al análisis del comportamiento en situación de movilidad normal y con la eventualidad de un incidente vial. Se propone la generación del modelo de micro simulación en el software Vissim 9.0, herramienta reconocida mundialmente en la generación y evaluación de modelos de tráfico. En primera instancia se genera un modelo que simula las condiciones normales del tráfico, logrando la caracterización de variables físicas del corredor tales como la geometría. Posteriormente, se generan los diferentes modelos que simulan el cierre de los carriles debido a la presencia de un incidente vial.

Teniendo en cuenta lo anterior, se procede a elaborar los modelos siguiendo cada una de las actividades mencionadas a continuación:

### 6.2.1. Descripción del modelo

Para poder predecir la forma como opera la red vial, se ha realizado una modelación de tránsito estática mediante el uso del software Vissim 9.0, tomando como referencia la hora pico del flujo



vehicular sur-norte de la Avenida Carrera 30 con Avenida Calle 53 07:00-08:00 horas (07:00-08:00 horas), establecida mediante el procesamiento de la información recibida desde la Secretaría de Movilidad. Para el análisis se utilizó la geometría existente en la red vial, al igual que los volúmenes vehiculares ya mencionados.

Una vez realizada la simulación en el programa VISSIM se verificaron y evaluaron los principales parámetros de la red, como son: demoras, niveles de servicio, velocidad promedio en la red.

Con estos datos se procede a realizar la evaluación de la infraestructura, para posteriormente definir los niveles de servicio, teniendo como punto de partida las demoras por vehículo, de acuerdo con la metodología establecida en el manual de planeación de tránsito para las intersecciones no semaforizadas y para las intersecciones semaforizadas (Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, 2005), a continuación se presentan los rangos establecidos para los niveles de servicio, según el tipo de infraestructura por evaluar:

Tabla 6 Niveles de servicio para intersecciones no Semaforizadas

NIVEL DE SERVICIO	DEMORAS PROMEDIO POR VEHÍCULO (Segundos/Vehículo)
A	0-10
B	>10 - 15
C	>15 - 25
D	>25 - 35
E	>35 - 50
F	>50

Fuente: (Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, 2005)

Tabla 7 Niveles de servicio para intersecciones Semaforizadas

NIVEL DE SERVICIO	DEMORAS PROMEDIO POR VEHÍCULO (Segundos/Vehículo)
A	0-10
B	>10 - 20
C	>20 - 35
D	>35 - 55

NIVEL DE SERVICIO	DEMORAS PROMEDIO POR VEHÍCULO (Segundos/Vehículo)
E	>55 – 80
F	>80

Fuente: (Instituto de Desarrollo Urbano - IDU, 2005)

### 6.2.2. Configuración del modelo

Con el fin de representar de manera real el comportamiento de la red vial, a continuación, se procede a hacer una explicación acerca de la metodología de montaje del modelo de micro-simulación, el cual se alimentará a partir de los datos recibidos desde la SDM (Secretaría Distrital de Movilidad - Dirección de Control y Vigilancia, 2017), los cuales se validarán mediante la calibración del modelo.

Con el fin de garantizar la fidelidad de la infraestructura evaluada, durante la elaboración del modelo de micro-simulación se deben tener en cuenta los siguientes parámetros:

- Carriles
- Elementos de Priorización de Movimientos
- Rutas
- Nodos de Evaluación

Lo anterior, define las características de la zona evaluada, y posteriormente facilita la calibración del modelo.

### 6.2.3. Carriles

La geometría y la sección transversal del tramo vial por simular es el parámetro por cual se inicia la elaboración del modelo de simulación de tráfico; en esta etapa se traza la trayectoria de del corredor vial, tratando de ser lo más fiel posible a la geometría encontrada en campo.

Los carriles son definidos mediante “arcos” y “conectores”, a los cuales se insertarán variables como áreas de reducción de velocidad. Así como los arcos representan tramos extensos de calzada, los conectores simulan el intercambio entre calzadas y el acceso, o salida, hacia otra vía, de tal forma que terminan simbolizando los movimientos vehiculares.

Este punto es de gran importancia dado que la optimización de las geometrías del modelo permitirá garantizar la confiabilidad de los resultados arrojados por el mismo.

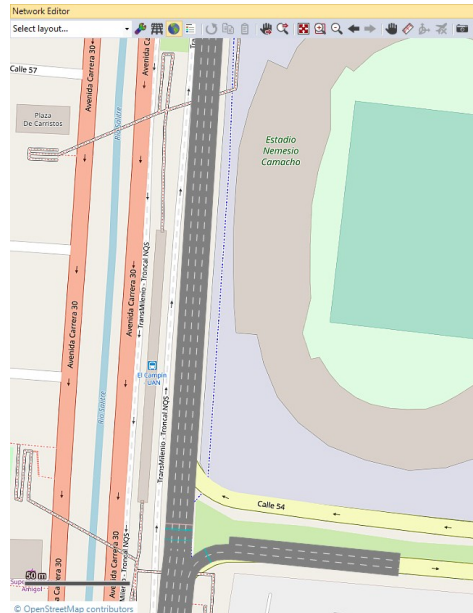
En la Figura 65 se presenta la geometría definida en el modelo de micro simulación:

Figura 15 Configuración de la red vial vehicular – Vista General



*Fuente: Elaboración propia con base en Vissim*

Figura 16 Configuración de la red vial vehicular – Zona de Estudio



Fuente: Elaboración propia con base en Vissim

### 6.2.4. Rutas

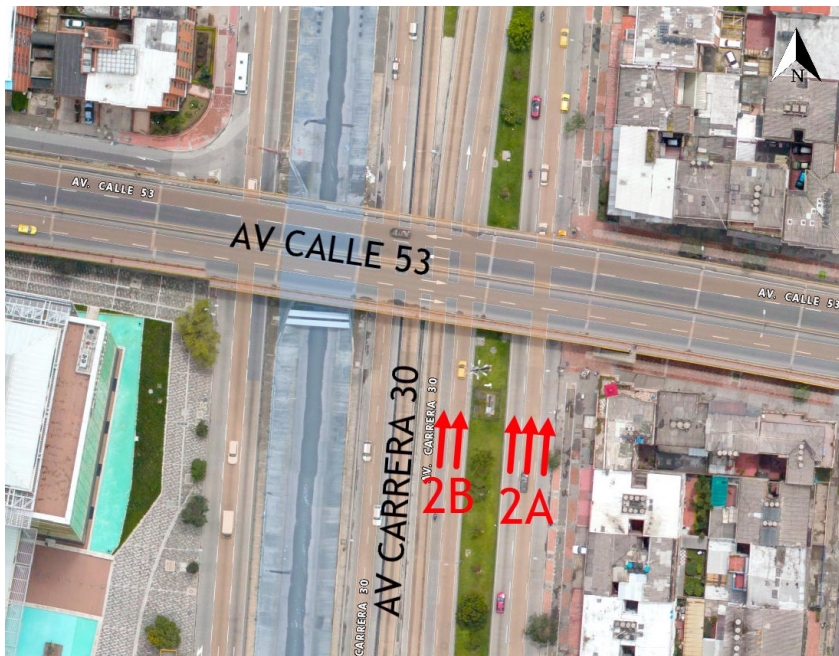
La generación de rutas dentro del modelo para vehículos: livianos, motos y vehículos pesados se realizará mediante la asignación de volúmenes por movimiento en cada intersección, partiendo de la información tomada en campo, prestando mayor interés a los principales corredores que alimentan la zona. Los datos de alimentación del modelo se evidencian en la Tabla 8, así como en la Figura 17, la Figura 18 y la Figura 19.

Tabla 8 Datos de entrada por tipo de vehículo

Intersección	Mov	Volúmenes HMD (07:00-08:00)					
		Autos	Buses	Camiones	Motos	Mixtos	Equivalentes
1. AK 30 x AC 53	2B	2544	1	69	2380	4994	3909
	2A	2648	123	158	1945	4874	4262
2. AK 30 x CL 53B	9(2)	273	2	4	151	430	363
	2A	2375	121	154	1794	4444	3899
3. AK 30 x CL 53B Bis	9(2)	954	39	29	1052	2074	1631
	2A	1421	82	125	742	2370	2269
4. AK 30 x CL 57A	2	3965	83	194	3122	7364	6177

Fuente: Elaboración propia con base (Secretaría Distrital de Movilidad - Dirección de Control y Vigilancia, 2017)

Figura 17 Movimientos vehiculares – Av. Carrera 30 x Av. Calle 53



*Fuente: Elaboración propia con base en (Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital - IDECA, 2019)*

Figura 18 Movimientos vehiculares – Av. Carrera 30 x Av. Calle 53B & Calle 53B Bis



*Fuente: Elaboración propia con base en (Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital - IDECA, 2019)*

Figura 19 Movimientos vehiculares – Av. Carrera 30 x Av. Calle 57



*Fuente: Elaboración propia con base en (Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital - IDECA, 2019)*

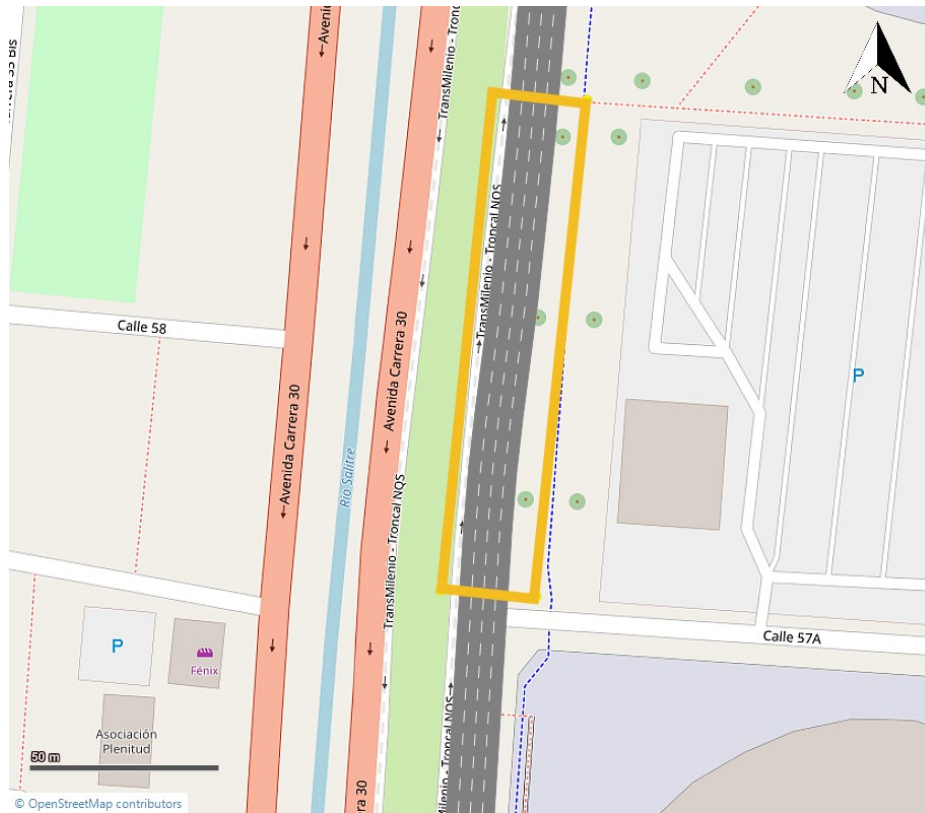
### 6.2.5. Nodos de evaluación

Finalmente, la importancia en la definición de los nodos de evaluación esta dada a que de allí se extraen los resultados del modelo, con los cuales se determinan los niveles de servicio. Entre las variables de evaluación se tienen:

- Demoras
- Número total de vehículos por arco
- Movimiento
- Niveles de Servicio

El nodo definido para la realización del análisis y su ubicación dentro del modelo de micro-simulación se evidencia en la Figura 20.

Figura 20 Nodo de evaluación – Modelo de simulación



*Fuente: Elaboración propia con base en Vissim*

### 6.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO

Los insumos para validar el modelo son los volúmenes vehiculares con los cuales se alimentaron el mismo, así como los resultados obtenidos tras la corrida de la simulación. La validación consiste en comparar los flujos asignados al modelo (datos de entrada), con los volúmenes vehiculares que la simulación corrió.

En el caso particular del presente estudio, los volúmenes vehiculares con los cuales se alimentó el modelo fueron obtenidos de la SDM, que a su vez los adquirió directamente de campo mediante una toma de información.

Como punto de control se estableció un nodo de evaluación, que dentro de sus funciones está el conteo de los vehículos que el modelo simula; esta información y los datos ingresados al modelo para situación normal del tráfico, son comparados para determinar la veracidad del modelo de tránsito.

Tanto los datos ingresados al modelo, como los resultados del mismo, corresponden a la hora de máxima demanda de la Avenida Carrera 30 en sentido de circulación sur-norte; con ello se pretende representar la situación en la cual el equipamiento existente es sometido a mayor estrés por demanda.

El proceso de calibración del modelo parte de un estadístico conocido como GEH (Federal Highway Administration, 2004), el cual fue desarrollado en los Estados Unidos. La aplicación del GEH se resuelve por su simplicidad en el análisis, de tal forma que valores de GEH por debajo de cinco (5), corresponden a un modelo con alto nivel de fidelidad.

$$GEH = \sqrt{\frac{(q_{obs} - q_{sim})^2}{0.5(q_{obs} + q_{sim})}}$$

Donde:

$q_{obs}$  Flujo vehicular aforado en el periodo de evaluación

$q_{sim}$  Flujo vehicular simulado en el periodo de evaluación

### 6.3.1. Calibración por volúmenes

En la Tabla 9 se presentan los resultados de la calibración por volúmenes obtenida del modelo para cada tipo de vehículo y para los vehículos mixtos, los datos por movimiento se incluyen en detalle en el Anexo.



Tabla 9 Calibración del modelo por volúmenes – Mixtos

No.	INTERSECCIÓN	MOVIMIENTO	FLUJO VEHICULAR OBSERVADO	FLUJO VEHICULAR MODELADO	CALIBRACIÓN GEH		CALIBRACIÓN FLUJOS		
					GEH	ACEPTACIÓN	INT. 1	INT. 2	INT. 3
1	AK 30 entre CL 53B Bis & CL 60	2	7364	7.375	0,1	1	-	-	1
			7.364	7.375	0,1	100%	-	-	100%
			TOTAL OBSERVADO	TOTAL MODELADO	GEH	% ACEPTACIÓN	% ACEPTACIÓN INT. 1	% ACEPTACIÓN INT. 2	% ACEPTACIÓN INT. 3
			0%						
			ERROR PRECISIÓN						
					✓	1	Flujos de arcos individuales		
					✓	2	Suma de todos los flujos por		
					✓	3	GEH para flujos por arco		
					✓	4	GEH para suma sobre flujos		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10 Calibración del modelo por volúmenes – Autos

No.	INTERSECCIÓN	MOVIMIENTO	FLUJO VEHICULAR OBSERVADO	FLUJO VEHICULAR MODELADO	CALIBRACIÓN GEH		CALIBRACIÓN FLUJOS		
					GEH	ACEPTACIÓN	INT. 1	INT. 2	INT. 3
1	AK 30 entre CL 53B Bis & CL 60	2	3965	3.955	0,2	1	-	-	1
			3.965	3.955	0,2	100%	-	-	100%
			TOTAL OBSERVADO	TOTAL MODELADO	GEH	% ACEPTACIÓN	% ACEPTACIÓN INT. 1	% ACEPTACIÓN INT. 2	% ACEPTACIÓN INT. 3
			0%						
			ERROR PRECISIÓN						
					✓	1	Flujos de arcos individuales		
					✓	2	Suma de todos los flujos por		
					✓	3	GEH para flujos por arco		
					✓	4	GEH para suma sobre flujos		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Calibración del modelo por volúmenes – Buses

No.	INTERSECCIÓN	MOVIMIENTO	FLUJO VEHICULAR OBSERVADO	FLUJO VEHICULAR MODELADO	CALIBRACIÓN GEH		CALIBRACIÓN FLUJOS		
					GEH	ACEPTACIÓN	INT. 1	INT. 2	INT. 3
1	AK 30 entre CL 53B Bis & CL 60	2	83	88	0,5	1	1	-	-
			83	88	0,5	100%	100%	-	-
			TOTAL OBSERVADO	TOTAL MODELADO	GEH	% ACEPTACIÓN	% ACEPTACIÓN INT. 1	% ACEPTACIÓN INT. 2	% ACEPTACIÓN INT. 3
			6%						
			ERROR PRECISIÓN						
					✓	1	Flujos de arcos individuales		
					✗	2	Suma de todos los flujos por		
					✓	3	GEH para flujos por arco		
					✓	4	GEH para suma sobre flujos		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12 Calibración del modelo por volúmenes – Camiones

No.	INTERSECCIÓN	MOVIMIENTO	FLUJO VEHICULAR OBSERVADO	FLUJO VEHICULAR MODELADO	CALIBRACIÓN GEH		CALIBRACIÓN FLUJOS		
					GEH	ACEPTACIÓN	INT. 1	INT. 2	INT. 3
1	AK 30 entre CL 53B Bis & CL 60	2	194	195	0,1	1	1	-	-
			194	195	0,1	100%	100%	-	-
			TOTAL OBSERVADO	TOTAL MODELADO	GEH	% ACEPTACIÓN	ACEPTACIÓN INT. 1	ACEPTACIÓN INT. 2	% ACEPTACIÓN INT. 3
			1%						
			ERROR PRECISIÓN						
					✓	1	Flujos de arcos individuales		
					✓	2	Suma de todos los flujos por		
					✓	3	GEH para flujos por arco		
					✓	4	GEH para suma sobre flujos		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13 Calibración del modelo por volúmenes – Motos

No.	INTERSECCIÓN	MOVIMIENTO	FLUJO VEHICULAR OBSERVADO	FLUJO VEHICULAR MODELADO	CALIBRACIÓN GEH		CALIBRACIÓN FLUJOS		
					GEH	ACEPTACIÓN	INT. 1	INT. 2	INT. 3
1	AK 30 entre CL 53B Bis & CL 60	2	3122	3.138	0,3	1	-	-	1
			3.122	3.138	0,3	100%	-	-	100%
			TOTAL OBSERVADO	TOTAL MODELADO	GEH	% ACEPTACIÓN	ACEPTACIÓN INT. 1	ACEPTACIÓN INT. 2	% ACEPTACIÓN INT. 3
			1%						
			ERROR PRECISIÓN						
					✓	1	Flujos de arcos individuales		
					✓	2	Suma de todos los flujos por		
					✓	3	GEH para flujos por arco		
					✓	4	GEH para suma sobre flujos		

Fuente: Elaboración propia

Con base en las tablas anteriores, se observa que la aceptación de los datos muestra una tendencia clara a garantizar la validez del modelo.

### 6.3.2. Calibración por velocidades

A continuación, se evidencia el resultado de la calibración por velocidades para cada tipo de vehículo y para los vehículos mixtos obtenida del modelo, se aclara que los datos de velocidad en los diferentes corredores se realizaron para la hora de máxima demanda por medio de la utilización de la técnica del vehículo flotante, cuyos datos se incluyen en el Anexo.

Tabla 14 Calibración del modelo por velocidades – Mixtos

No.	TRAMO VIAL	VELOCIDAD OBSERVADA	VELOCIDAD RESULTANTE MODELO	CALIBRACIÓN ALT 1		CALIBRACIÓN ALT 2	
				DIFERENCIA	ACEPTACIÓN	DIFERENCIA	ACEPTACIÓN
1	1: AK 30 entre CL 53B BIS & CL 60	41	41	0,1	1	0,1	1

100%
% ACEPTACIÓN ALT. 1

100%
% ACEPTACIÓN ALT. 2

✓	1	Velocidad promedio relativa a lo observado (10%)
✓	2	Velocidad dentro del 15% de la velocidad observada

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15 Calibración del modelo por velocidades – Autos

No.	TRAMO VIAL	VELOCIDAD OBSERVADA	VELOCIDAD RESULTANTE MODELO	CALIBRACIÓN ALT 1		CALIBRACIÓN ALT 2	
				DIFERENCIA	ACEPTACIÓN	DIFERENCIA	ACEPTACIÓN
1	1: AK 30 entre CL 53B BIS & CL 60	39	41	1,5	1	1,5	1

100%
% ACEPTACIÓN ALT. 1

100%
% ACEPTACIÓN ALT. 2

✓	1	Velocidad promedio relativa a lo observado (10%)
✓	2	Velocidad dentro del 15% de la velocidad observada

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16 Calibración del modelo por velocidades – Buses

No.	TRAMO VIAL	VELOCIDAD OBSERVADA	VELOCIDAD RESULTANTE MODELO	CALIBRACIÓN ALT 1		CALIBRACIÓN ALT 2	
				DIFERENCIA	ACEPTACIÓN	DIFERENCIA	ACEPTACIÓN
1	1: AK 30 entre CL 53B BIS & CL 60	32	34	2,6	1	2,6	1

100%
% ACEPTACIÓN ALT. 1

100%
% ACEPTACIÓN ALT. 2

✓	1	Velocidad promedio relativa a lo observado (10%)
✓	2	Velocidad dentro del 15% de la velocidad observada

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Calibración del modelo por velocidades – Camiones

No.	TRAMO VIAL	VELOCIDAD OBSERVADA	VELOCIDAD RESULTANTE MODELO	CALIBRACIÓN ALT 1		CALIBRACIÓN ALT 2	
				DIFERENCIA	ACEPTACIÓN	DIFERENCIA	ACEPTACIÓN
1	1: AK 30 entre CL 53B BIS & CL 60	35	37	2,3	1	2,3	1

100%	100%
% ACEPTACIÓN ALT. 1	% ACEPTACIÓN ALT. 2

✔	1	Velocidad promedio relativa a lo observado (10%)
✔	2	Velocidad dentro del 15% de la velocidad observada

*Fuente: Elaboración propia*

Tabla 18 Calibración del modelo por velocidades – Motos

No.	TRAMO VIAL	VELOCIDAD OBSERVADA	VELOCIDAD RESULTANTE MODELO	CALIBRACIÓN ALT 1		CALIBRACIÓN ALT 2	
				DIFERENCIA	ACEPTACIÓN	DIFERENCIA	ACEPTACIÓN
1	1: AK 30 entre CL 53B BIS & CL 60	44	42	2,1	1	2,1	1

100%	100%
% ACEPTACIÓN ALT. 1	% ACEPTACIÓN ALT. 2

✔	1	Velocidad promedio relativa a lo observado (10%)
✔	2	Velocidad dentro del 15% de la velocidad observada

*Fuente: Elaboración propia*

#### 6.4. ESCENARIOS DE EVALUACIÓN

La definición de los escenarios está dado por el número de carriles cerrados, la ubicación de dichos carriles y la longitud de la transición de cierre. La cantidad de carriles cerrados se asocia al tipo de incidente, por ello la evaluación se realizará individualmente, pero el análisis de los resultados será conjunto.

Con el fin de comprender los escenarios de evaluación definidos, se le asigna un número a cada uno de los carriles, tal y como lo hace el Vissim, de derecha a izquierda; siendo el carril 1 el más próximo al andén y el carril 4, el carril junto a la calzada exclusiva del sistema masivo de transporte Transmilenio, tal y como se aprecia en la Figura 21.

Figura 21 Carriles calzada sur-norte Avenida NQS

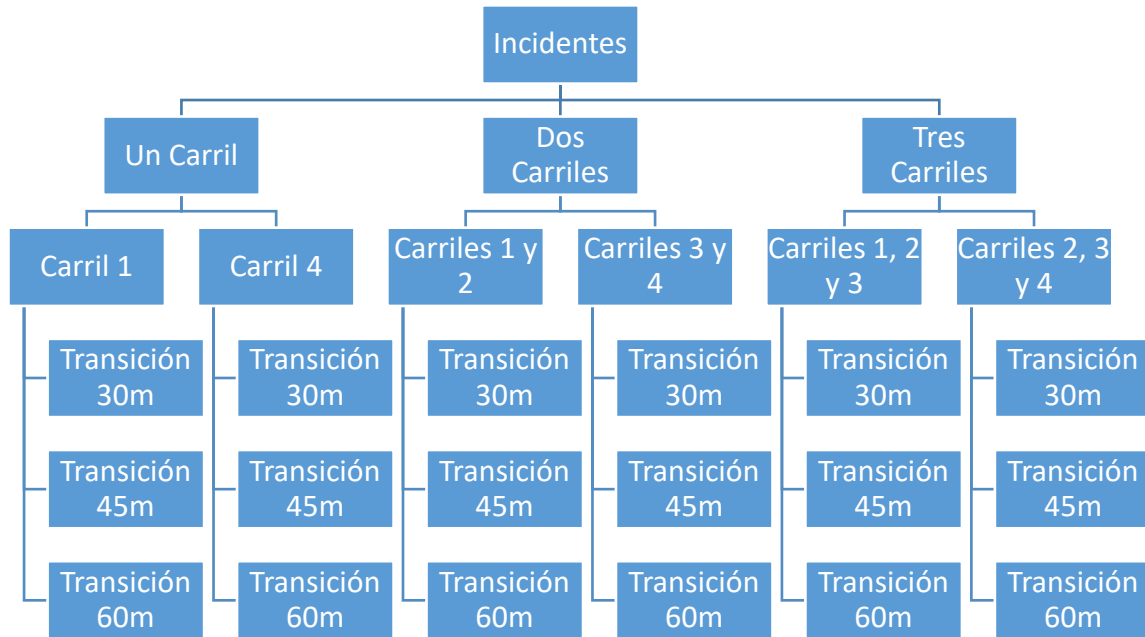


*Fuente: Elaboración propia*

Por otra parte, y teniendo en cuenta el Concepto Técnico 18 (Secretaría Distrital de Movilidad-SDM, 2009), las longitudes de transición en los cierres para obras varían entre 30 y 60 metros, teniendo en cuenta la velocidad máxima del corredor, y ya que la velocidad del flujo vehicular se compromete durante un incidente, se proponen tres longitudes de transición (30, 45 y 60 metros) para evaluar en el Vissim.

Así las cosas, se corrieron 18 diferentes combinaciones de cierre, más el modelo actual que servirá como parámetro comparativo. En la Figura 22 se presentan los modelos que se evaluarán en función al número de carriles ocupados y a la longitud de transición empleada.

Figura 22 Cierres por incidentes viales – Modelos de evaluación



Fuente: Elaboración propia

### 6.5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Tabla 19 se presentan los resultados tras correr el modelo de micro-simulación de tránsito para la situación actual (escenario sin incidente), y para todos los demás escenarios de evaluación. La situación Actual tiene un nivel de servicio A, es decir, los vehículos circulan dentro del flujo sin inconvenientes; por otro lado, se evidencia que a mayor número de carriles cerrados por el incidente, peor será el Nivel de Servicio.

Tabla 19 Resultados de Evaluación

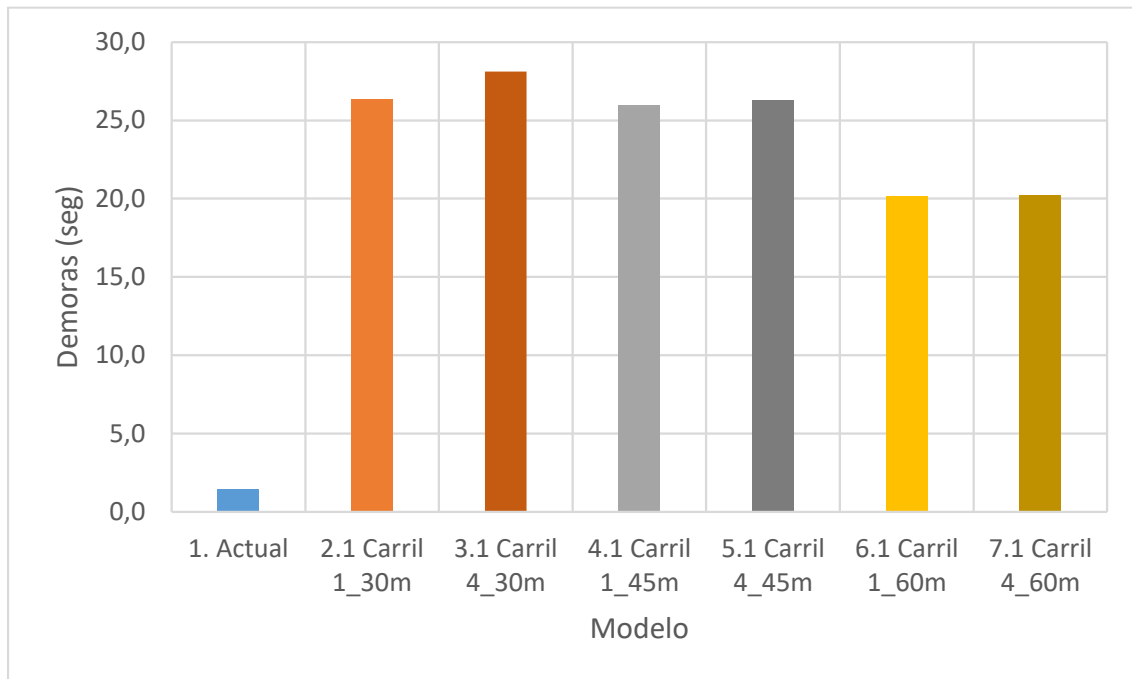
INTERSECCIÓN	MODELO	DEMORA (seg)	NS POR DEMORA	COLA PROMEDIO (m)	COLA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (Km/h)
AK 30 x CL 57	1. Actual	1,4	A	0,0	1,6	40,9
	2.1 Carril 1_30m	26,4	D	253,6	504,1	21,5
	2.2 Carril 1 & 2_30m	49,5	E	499,0	515,9	12,7
	2.3 Carril 1, 2 & 3_30m	166,8	F	505,5	516,0	4,8
	3.1 Carril 4_30m	28,1	D	268,1	504,0	21,6
	3.2 Carril 4 & 3_30m	53,9	F	498,9	515,2	12,0
	3.3 Carril 4, 3 & 2_30m	258,3	F	505,4	516,0	3,2
	4.1 Carril 1_45m	26,0	D	225,6	445,3	22,1

INTERSECCIÓN	MODELO	DEMORA (seg)	NS POR DEMORA	COLA PROMEDIO (m)	COLA MÁXIMA (m)	VELOCIDAD (Km/h)
	4.2 Carril 1 & 2_45m	53,2	F	500,1	515,9	12,1
	4.3 Carril 1, 2 & 3_45m	115,9	F	505,2	515,9	7,0
	5.1 Carril 4_45m	26,3	D	183,1	487,0	23,9
	5.2 Carril 4 & 3_45m	54,7	F	498,5	515,9	12,0
	5.3 Carril 4, 3 & 2_45m	234,6	F	505,7	515,9	3,7
	6.1 Carril 1_60m	20,1	C	112,5	287,8	28,0
	6.2 Carril 1 & 2_60m	68,8	F	501,7	515,8	10,5
	6.3 Carril 1, 2 & 3_60m	185,3	F	505,1	516,0	4,3
	7.1 Carril 4_60m	20,2	C	96,4	285,4	29,3
	7.2 Carril 4 & 3_60m	69,0	F	501,7	515,9	10,5
	7.3 Carril 4, 3 & 2_60m	217,8	F	505,3	515,6	3,7

*Fuente: Elaboración propia*

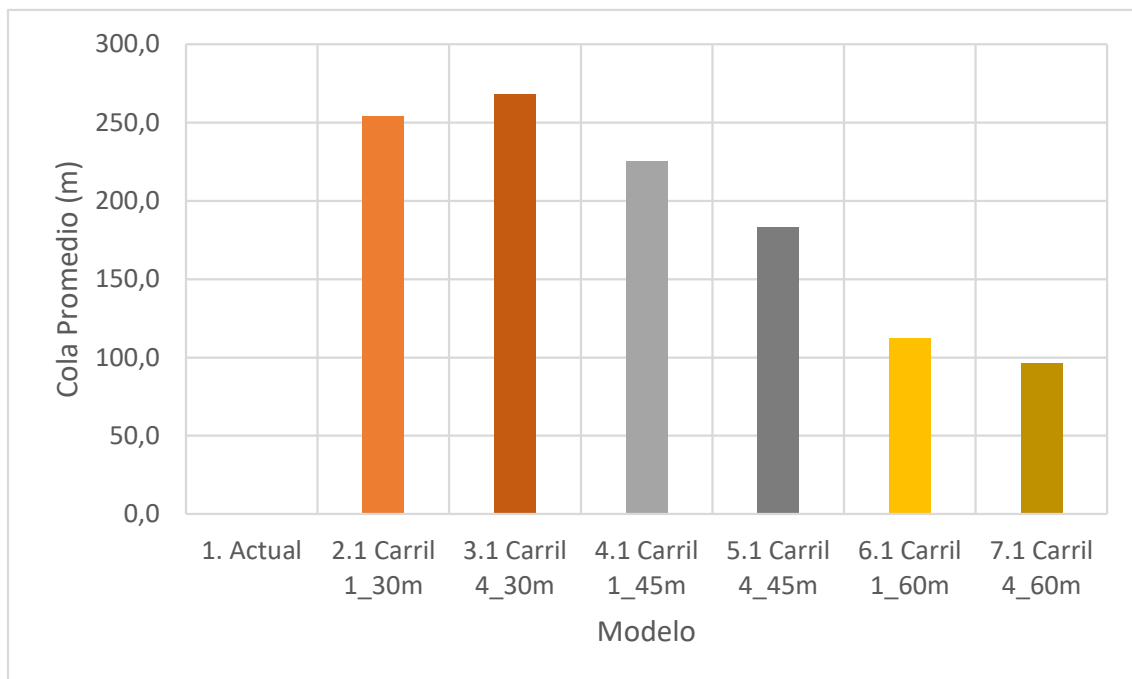
Al analizar las demoras generadas por el cierre de uno de los carriles de la NQS (ver Figura 23), se concluye que la transición que genera menores demoras es la de 60 metros. Este razonamiento se repite con las Colas Promedio (ver Figura 24) y con las Colas Máximas (ver Figura 25), ya que con este cierre el incidente generará longitudes de cola menores. De igual forma, al revisar la Velocidad Promedio (ver Figura 26), se evidencia que la velocidad es directamente proporcional a la longitud de la transición.

Figura 23 Demoras cierre de Un Carril



*Fuente: Elaboración propia*

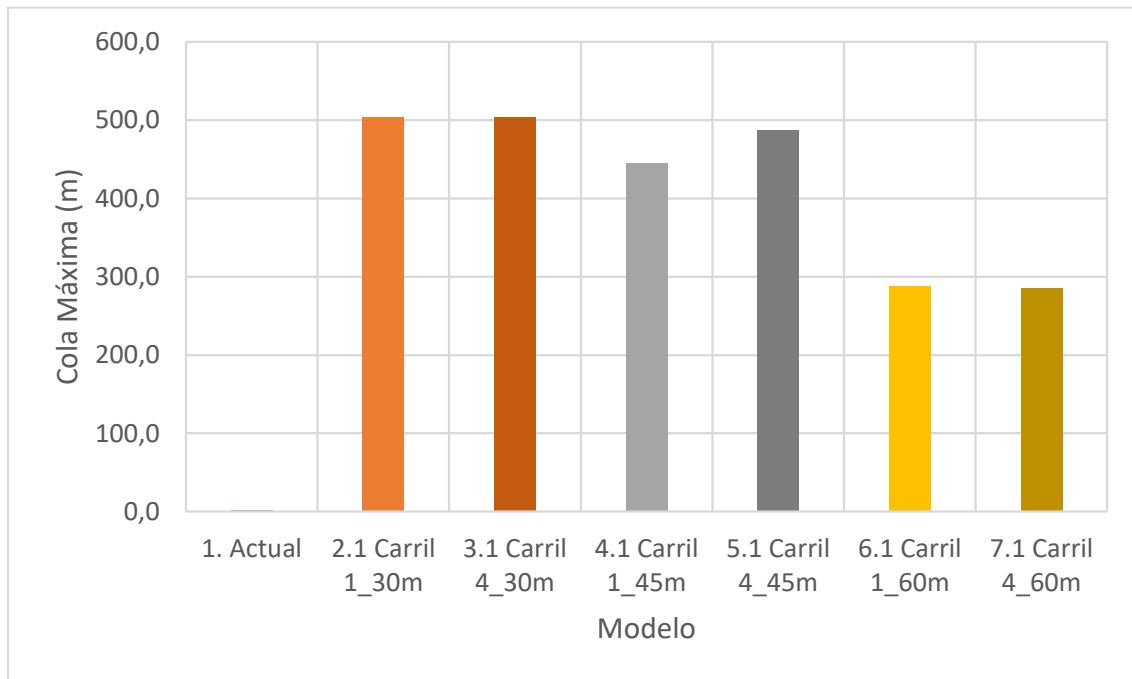
Figura 24 Cola Promedio cierre de Un Carril



*Fuente: Elaboración propia*

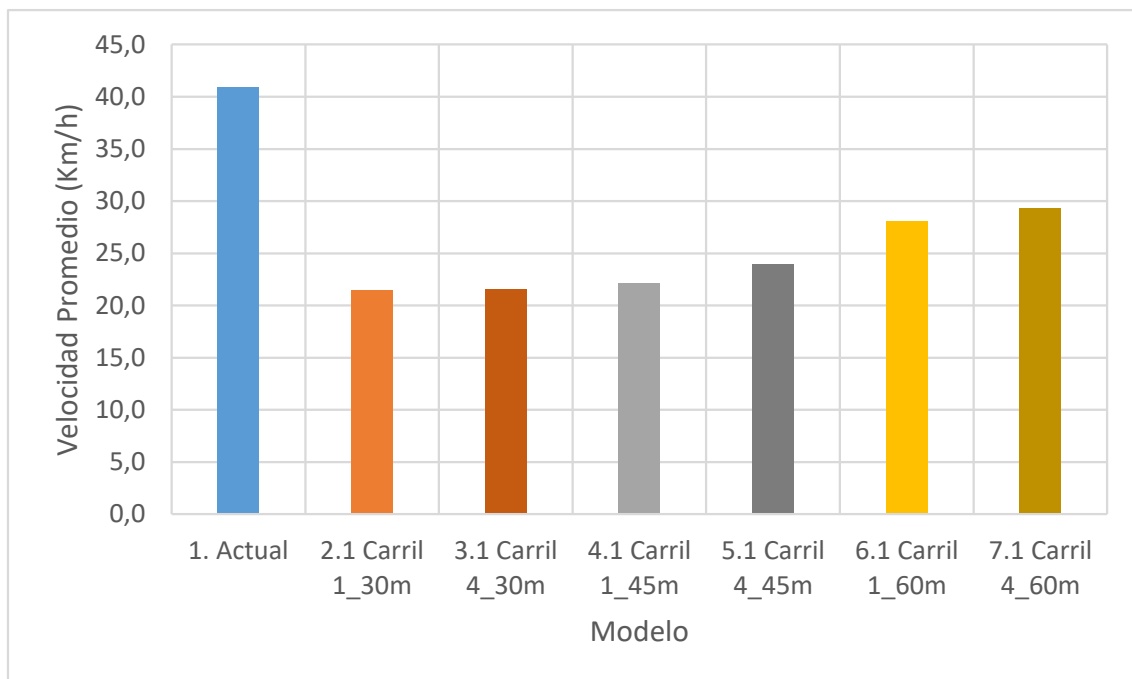


Figura 25 Cola Máxima cierre de Un Carril



*Fuente: Elaboración propia*

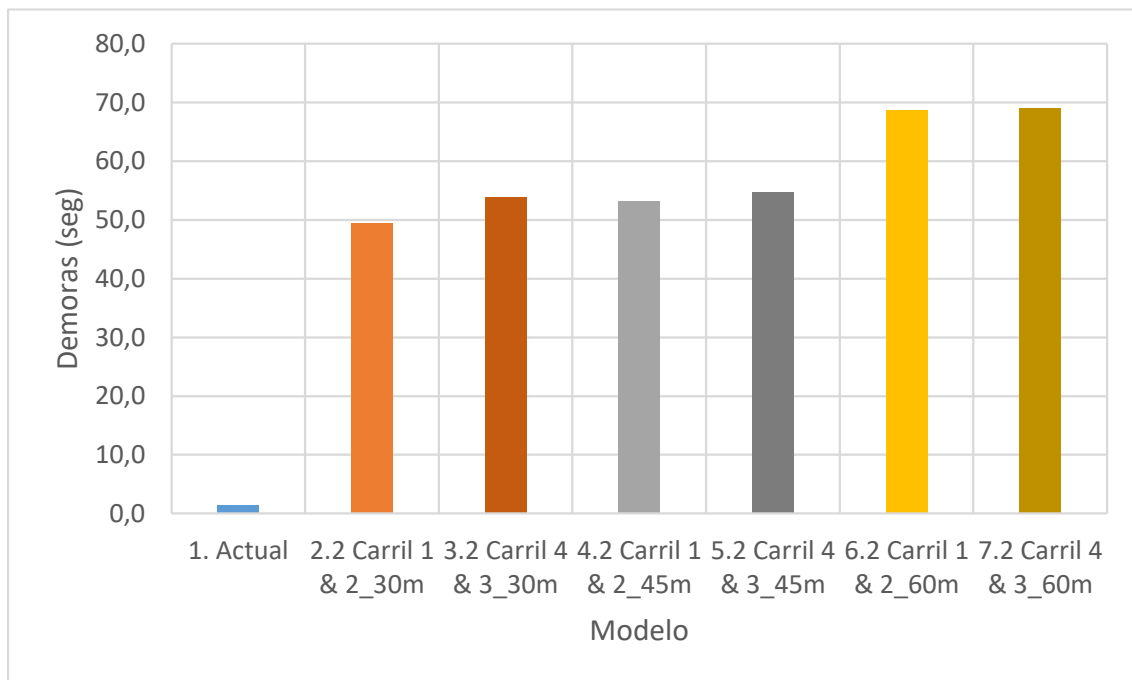
Figura 26 Velocidad Promedio cierre de Un Carril



*Fuente: Elaboración propia*

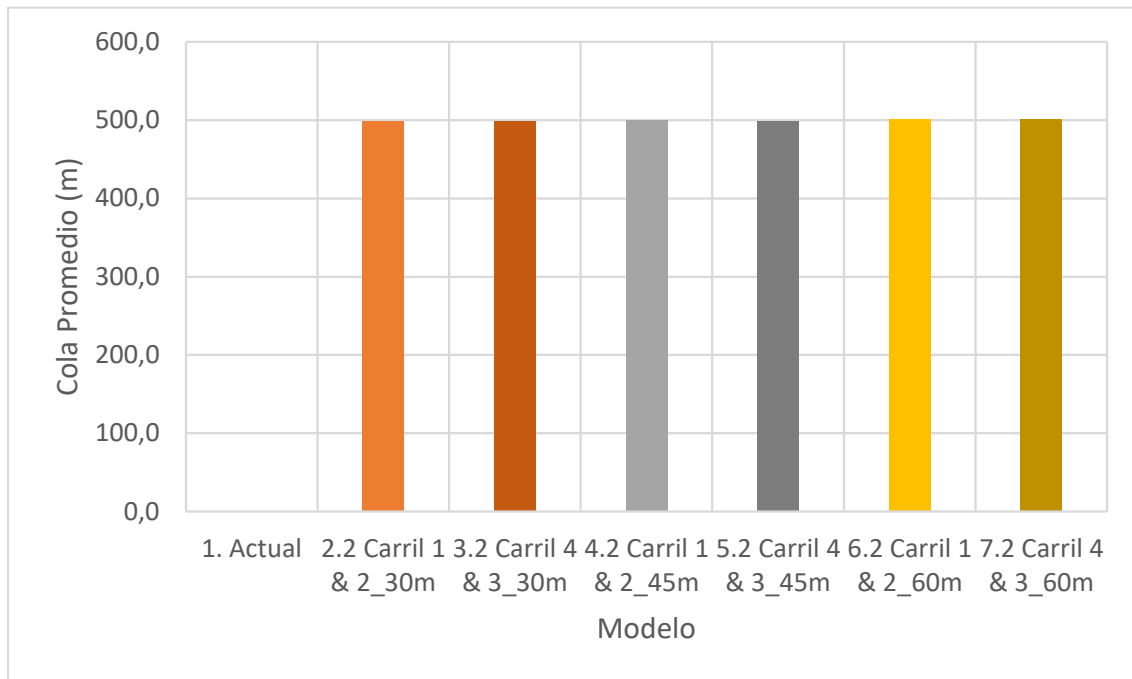
Por otro lado, el cierre de dos carriles contiguos presenta un comportamiento opuesto a lo anterior; las transiciones de 30 metros generan menores demoras en el tráfico (ver Figura 27), por su parte las Colas Promedio (ver Figura 28) y las Colas Máximas (ver Figura 29), resultan ser un parámetros inoperantes para incidentes de este tipo. Adicionalmente, la Velocidad Promedio (ver Figura 30), confirma que la mejor opción para incidentes con cierre de dos carriles, es la implementación de transiciones de 30 metros.

Figura 27 Demoras cierre de Dos Carriles



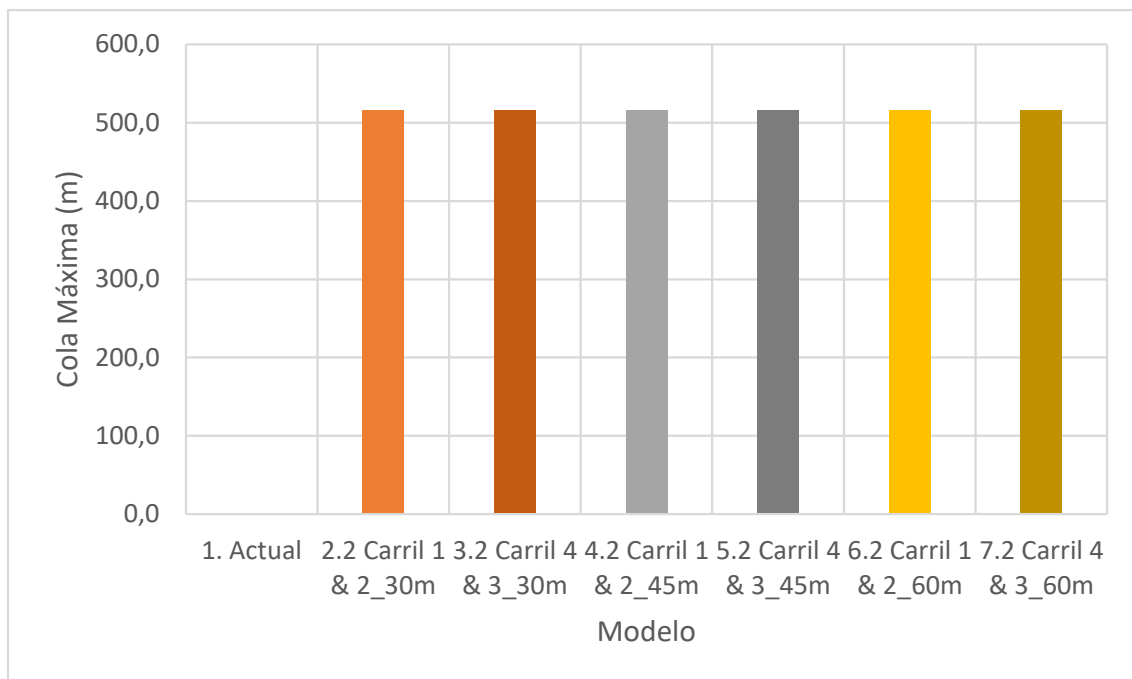
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 28 Cola Promedio cierre de Dos Carriles



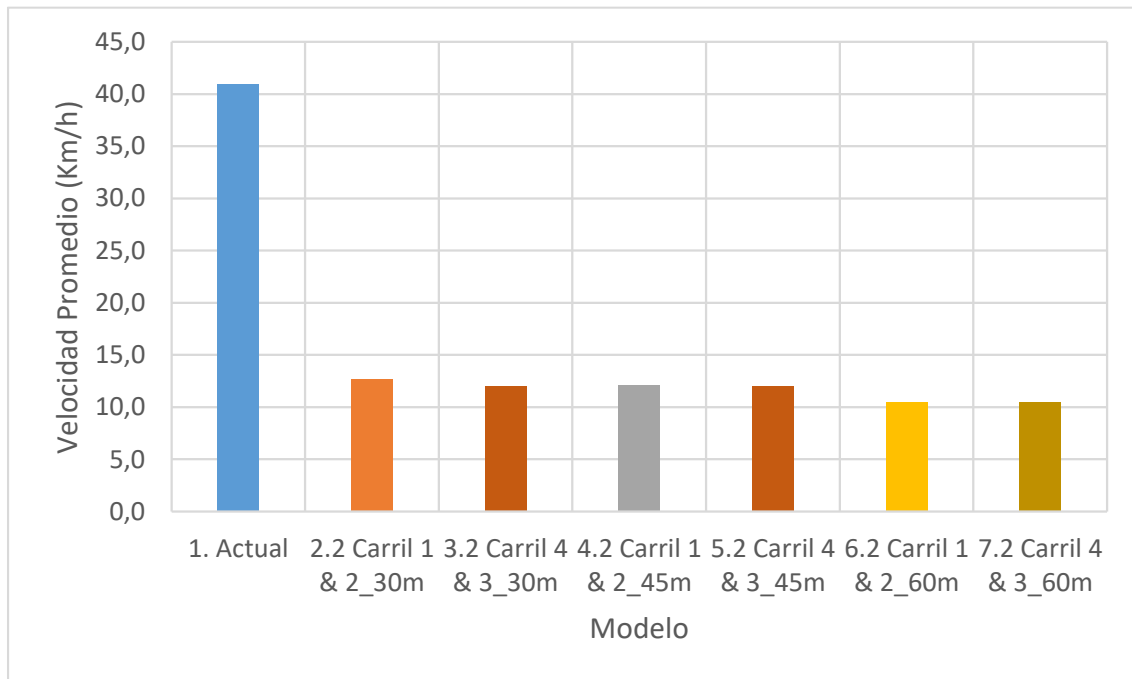
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 29 Cola Máxima cierre de Dos Carriles



*Fuente: Elaboración propia*

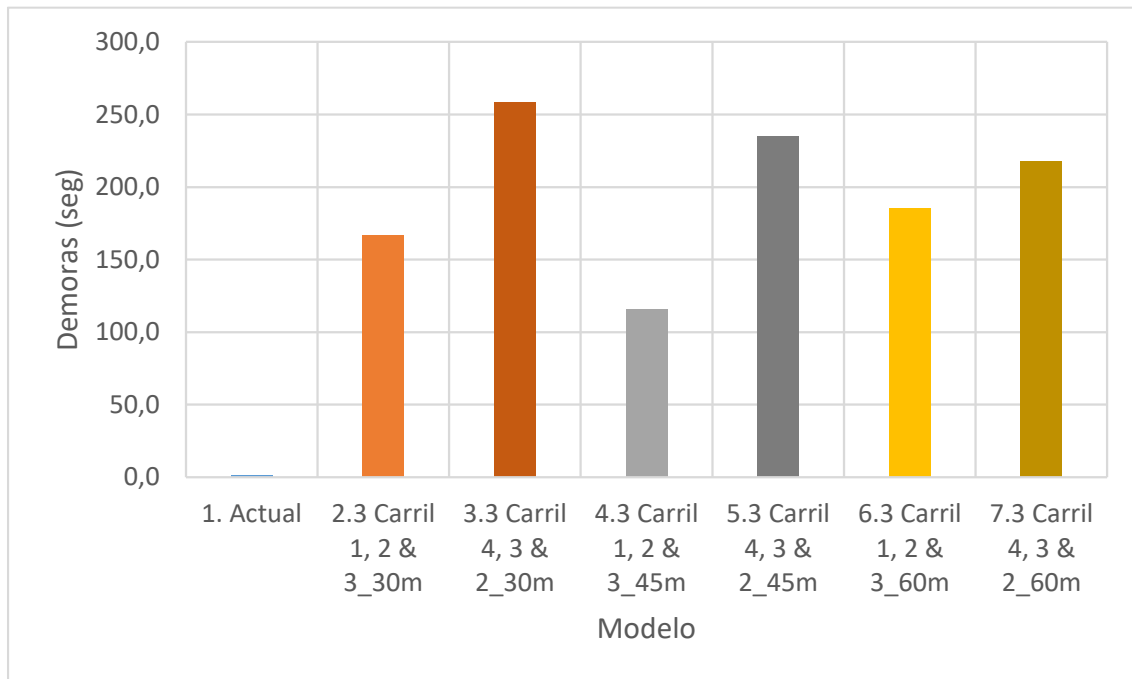
Figura 30 Velocidad Promedio cierre de Dos Carriles



*Fuente: Elaboración propia*

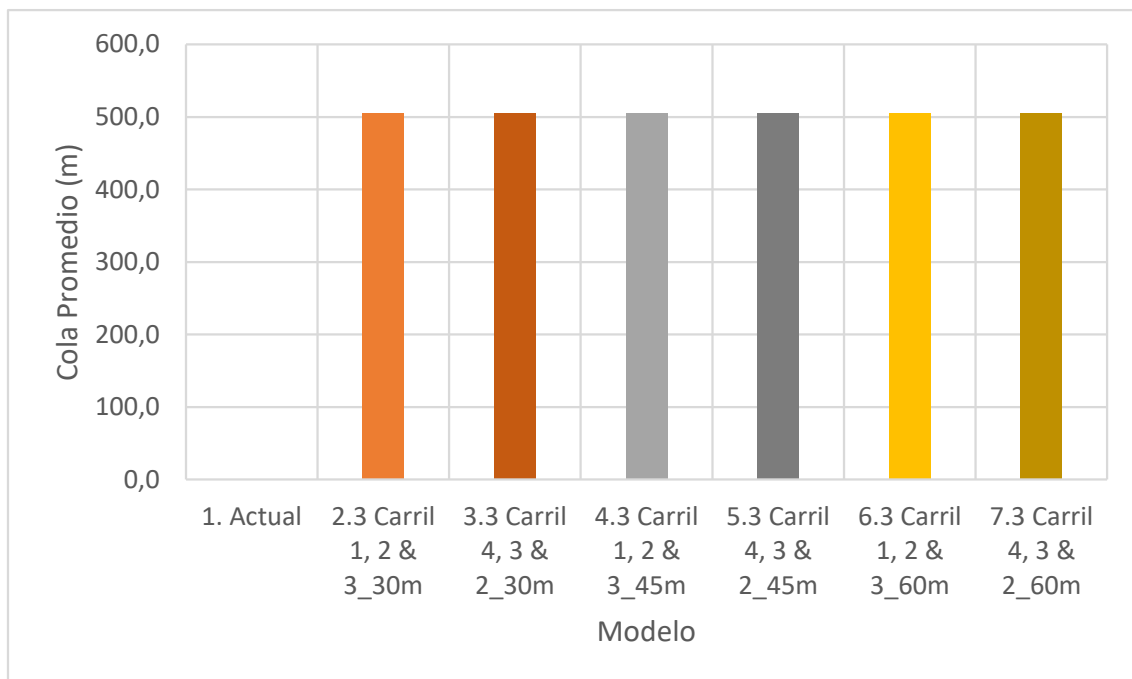
Finalmente, los incidentes que impliquen el cierre de tres carriles generan una particularidad que se dirige en función del carril que queda habilitado; cuando el cierre es de los carriles 1, 2 y 3, quedando habilitado para el flujo el carril 4, las menores demoras se generan con una transición de 45 metros (ver Figura 31); en cambio cuando el cierre es de los carriles 2, 3 y 4, quedando habilitado el carril 1, las menores demoras se presentan con una transición de 60 metros. Al igual que en el cierre de dos carriles, las Colas Promedio (ver Figura 32) y las Colas Máximas (ver Figura 33), no son un factor determinante en la escogencia de la longitud de la transición. Ahora, la Velocidad Promedio (ver Figura 34), dirige que la transición debería ser de 45 metros, independientemente del carril que quede habilitado.

Figura 31 Demoras cierre de Tres Carriles



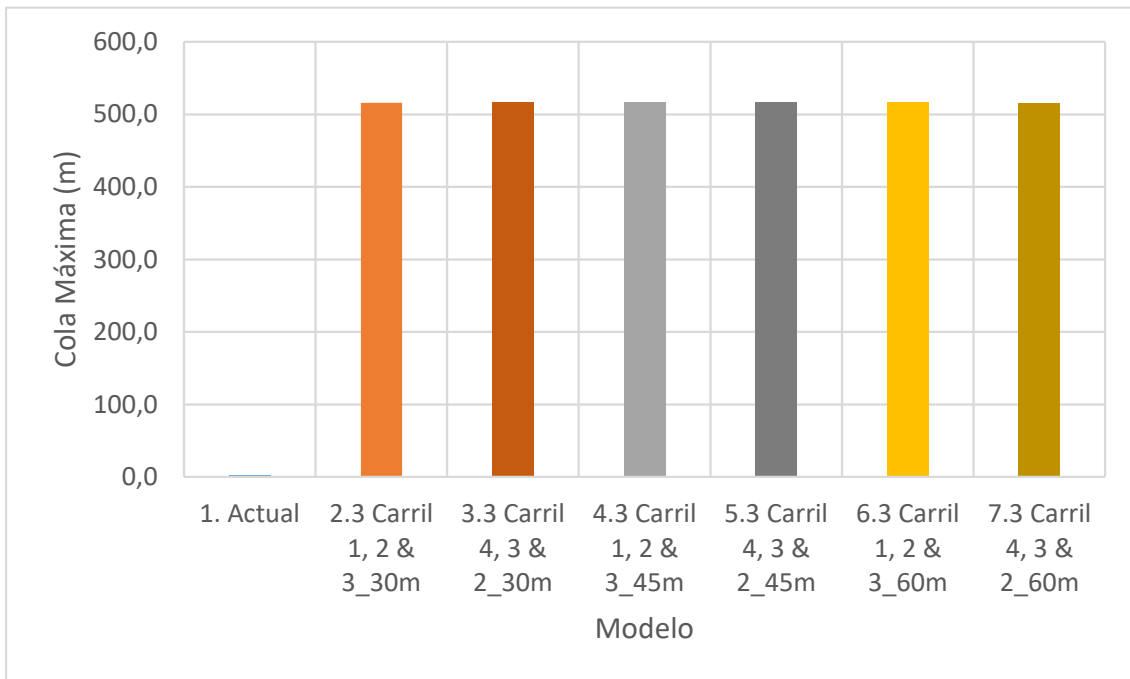
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 32 Cola Promedio cierre de Tres Carriles



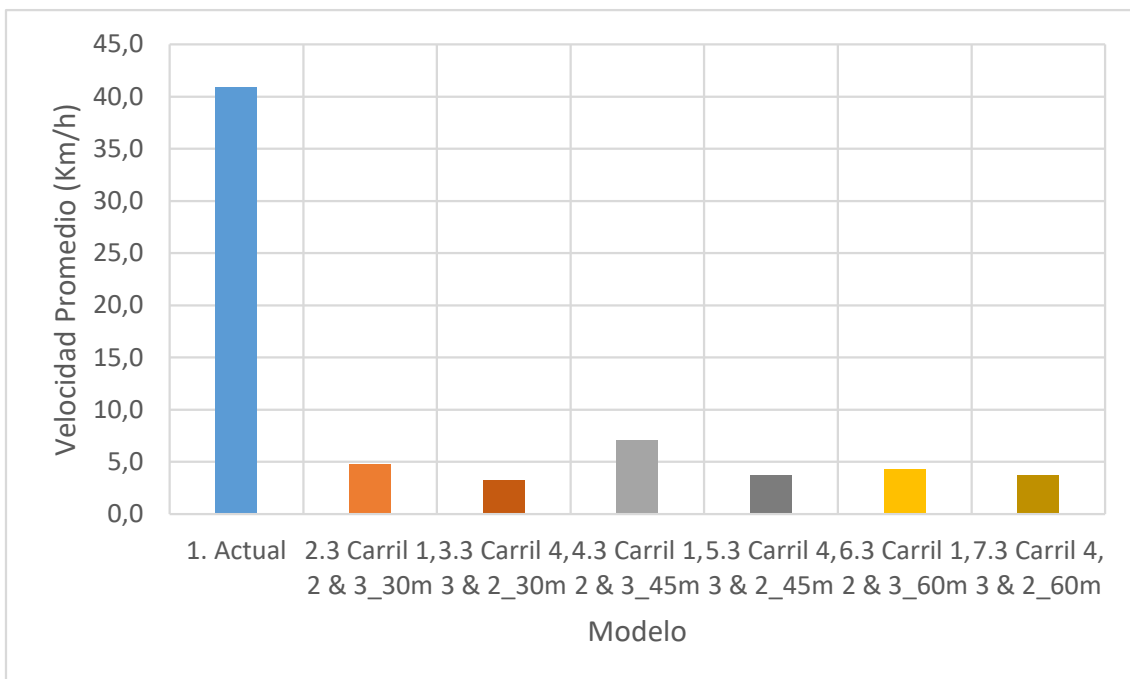
*Fuente: Elaboración propia*

Figura 33 Cola Máxima cierre de Tres Carriles



*Fuente: Elaboración propia*

Figura 34 Velocidad Promedio cierre de Tres Carriles



*Fuente: Elaboración propia*

## 7. CONCLUSIONES

Como se evidencio en los resultados, la ocurrencia de cualquier siniestro vial sobre la Carrera 30, deriva en una pérdida de tiempo para los usuarios de la vía. Es por ello que la implementación de políticas de gestión de incidentes, así como su manejo en campo, resulta muy beneficioso para la movilidad del sector.

La experiencia internacional en la gestión y atención de siniestros viales se enfoca en vías de carácter interestatal, para el caso norteamericano. Por su parte, la experiencia local se ha enfocado en minimizar el impacto de las obras de infraestructura; las autoridades exigen la elaboración, implementación y seguimiento de planes de manejo de tráfico orientados al reordenamiento del tráfico durante el tiempo de obra. Recientemente en Europa se empieza a hablar sobre la gestión y atención de siniestros en vías urbanas.

La utilización de herramientas computacionales, que resultan de la experiencia acumulada de muchos investigadores, es muy importante para el análisis y comprensión de problemáticas habituales. Es por ello que el empleo de un programa como VISSIM, resulta ideal para los estudios relacionados con el tránsito y la capacidad vial.

A la luz del presente análisis se elaboraron 19 diferentes escenarios, incluyendo la situación actual sin incidentes; cada uno de estos escenarios simulando un cierre particular, con el fin de lograr un abanico de resultados.

Para incidentes que impliquen el cierre de un carril de la Avenida NQS, a la altura del estadio El Campin, se recomienda la implementación de una transición de 60 metros de longitud. Esta transición encausará y facilitará el flujo vehicular, minimizando las demoras generadas por el mismo incidente.

La ocurrencia de incidentes que requieran del cierre de dos carriles, la conclusión es que se debería implementar una transición de al menos 30 metros de longitud.

Finalmente, para incidentes cuyo impacto demande el cierre de tres carriles, se deberían implementar transiciones de 45 metros de longitud.

El efecto de la pandemia sobre los hábitos de movilidad de los bogotanos es un parámetro que todos los habitantes de la ciudad han percibido. Sin embargo, debido a que la pandemia aún persiste, cuantificar dichos efectos sobre el parque automotor de la ciudad, así como los flujos vehiculares en la Avenida Carrera 30, es algo que la SDM hasta el momento no ha estudiado. Es por ello que resulta viable la utilización de las tasas de crecimiento suministradas por la SDM, cuya valides al momento de hacer este documento NO ha sido debatida.



## 8. RECOMENDACIONES

Es importante, no solo en esta investigación si no en todas, el efecto que tendrá la pandemia sobre la movilidad en Bogotá. Es por ello, que una vez se esclarezca el impacto socioeconómico de la pandemia, se actualicen los resultados del presente documento, específicamente en las tasas de crecimiento vehicular.

Teniendo en cuenta los diferentes perfiles viales que se encuentra en la infraestructura vial existente en Bogotá, resultaría provechoso la ampliación del análisis realizado en el presente documento, a todas las vías arteriales de la ciudad. Esto con el fin de tener una base para una política o programa de gestión y atención de incidentes viales.

La utilización de herramientas computacionales es una actividad que se populariza entre los profesionales, específicamente en aquellos que se dedican al diseño y la consultoría. Es por ello que resulta valioso fomentar el aprendizaje de programas de computadora desde la formación de los profesionales, de tal forma que insto a las directivas de la universidad a la adquisición de software como el Vissim, con el fin de suplementar la formación de los estudiantes de ingeniería civil, específicamente en la rama de la ingeniería de tránsito.



## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Nacional de Infraestructura-ANI. (25 de Noviembre de 2020). *ANI*. Obtenido de <https://www.ani.gov.co/proyectos-5g-en-etapa-de-estructuracion>

Alcalde Mayor de Bogotá. (22 de Junio de 2004). *Decreto 190 de 2004. Por medio del cual se compilan las disposiciones contenidas en los Decretos Distritales 619 de 2000 y 469 de 2003*. Bogotá.

American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO. (2009). *Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways*. Washington.

American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO. (2011). *Policy on Geometric Design of Highways and Streets*. Washington.

Banco Mundial. (03 de 09 de 2020). *Banco Mundial*. Obtenido de <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.PCAP.CD?locations=CO>

Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de Tránsito Fundamentos y Aplicaciones*. Ciudad de México: Alfaomega.

Concejo de Bogotá D.C. (30 de Noviembre de 2006). *Acuerdo 257 de 2006. Por el cual se dictan normas básicas sobre la estructura, organización y funcionamiento de los organismos y de las entidades de Bogotá, Distrito Capital, y se expiden otras disposiciones*. Bogotá.

Departamento Nacional de Planeación-DPN. (28 de Agosto de 2016). *Departamento Nacional de Planeación*. Obtenido de DPN advierte que se avecina colapso de movilidad en las principales capitales:

<https://www.dnp.gov.co/Paginas/DNP%20advierte%20que%20se%20avecina%20colapso%20de%20movilidad%20en%20las%20principales%20capitales.aspx>

Diario el Tiempo. (27 de Abril de 2016). *El Tiempo*. Obtenido de Lo difícil que es salir ileso de un accidente con moto en Bogotá: <http://www.eltiempo.com/bogota/cifras-sobre-accidentes-en-motocicletas-en-bogota/16574203>

Diaz, O. (19 de Enero de 2017). *SDM-3182-17*. Bogotá.

Dirección de Seguridad Vial y Comportamiento del Tránsito-SDM. (2017). *Tasas de crecimiento vehicular*. Bogotá.

Elservier. (13 de Septiembre de 2020). *Scopus*. Obtenido de Scopus: <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic>

Espindola, R. C. (1994). *Ingeniería de Tránsito*. México: Alfaomega.

Federal Highway Administration. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Software*. Washington: U.S. Department of Transportation.

Federal Highway Administration. (2010). *Traffic Incident Management Handbook*. Washington: U.S. Department of Transportation.

Institute of Transportation Engineers. (2016). *Traffic Engineering Handbook*. Washington.

Instituto de Desarrollo Urbano - IDU. (2005). *Manual de Planeación y Diseño para la Administración del Tránsito y Transporte*. Bogotá.

Jeong, E. (2017). Evaluating the effectiveness of active vehicle safety systems. *Accident Analysis and Prevention*, 85-96.

- Kukkapalli, V. (2019). Modeling the effect of a freeway road construction project on link-level travel times. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 1-15.
- Kutz, M. (2011). *Handbook of Transportation Engineering*. Nueva York: McGraw-Hill Education.
- Ministerio de Transporte. (2015). *Manual de Señalización Vial*. Bogotá.
- Ministerio de Transporte. (25 de Noviembre de 2020). *MinTransporte*. Obtenido de <https://mintransporte.gov.co/publicaciones/9128/sistema-estrategico-de-transporte-publico-de-monteria-avanza-en-la-ejecucion-de-obras-para-su-implementacion/>
- Observatorio Ambiental de Bogotá. (28 de Agosto de 2016). *Observatorio Ambiental de Bogotá*. Obtenido de Indicadores Ambientales-Movilidad Sostenible: <http://oab.ambientebogota.gov.co/es/temas?v=6&p=21>
- Policia Nacional de Colombia. (28 de Agosto de 2016). *Policia Nacional*. Obtenido de Dirección de Tránsito y Transportes: [http://www.policia.gov.co/portal/page/portal/Direccion\\_Transito\\_transportes/Documentacion](http://www.policia.gov.co/portal/page/portal/Direccion_Transito_transportes/Documentacion)
- Publicaciones Semana S.A. (2014). Bogotá ¿Cuál es la infraestructura urbana pendiente? *Revista Semana*.
- Reyes, L. (2018). Evaluation of the cost-effectiveness of freeway service patrol for reducing nonrecurrent congestion. *Joint Conference for Urban Mobility in the Smart City-Medellín*, 37-42.

- Ru, H. (2019). Modelling Travel Time after Incidents on Freeway Segments in China. *IEEE Acces*, 162465-162475.
- Ruzicka, J. (2020). Crisis management as the part of smart traffic control in cities. *2020 Smart Cities Symposium Prague*.
- Saniger, A. (2013). *Origen y principios básicos de la micro-simulación*. México.
- Secretaria Distrital de Movilidad - Dirección de Control y Vigilancia. (30 de Enero de 2017). SDM-DSVCT-5255-17. Bogotá, Colombia.
- Secretaria Distrital de Movilidad. (2014). *Contrato 1453-2014*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Movilidad. (30 de Enero de 2017). *SDM-DSVCT-5255-17*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Movilidad-SDM. (2009). *Concepto Técnico No 18*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Movilidad-SDM. (2011). *Encuesta de Movilidad de Bogotá*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Movilidad-SDM. (25 de Noviembre de 2020). *SIMUR*. Obtenido de <https://www.simur.gov.co/portal-simur/datos-del-sector/datos-abiertos/>
- State of New Jersey. (2010). *Highway Incident Traffic Safety Guidelines for Emergency Responders*. Nueva Jersey.
- Transportation Research Board. (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington: National Academy of Sciences.
- Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital - IDECA. (25 de Mayo de 2019). *Mapas Bogotá*. Obtenido de <https://mapas.bogota.gov.co/#>

Xie, W. (2015). Modelling the impact scope of urban express way incident. *3rd International Conference on Transportation Information and Safety*, 121-125.

Yip, C. (2016). A network-based congestion management model for Safety Service Patrol vehicle deployment. *IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium*, 26-31.

Zang, J. (2017). A Temporal and Spatial Model of Congestion Propagation and Dissipation on Expressway Caused by Traffic Incidents. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 179-185.