

**ESTRATEGIAS DE ATENCIÓN DE INCIDENTES DE TRÁNSITO EN
VÍA LAS PALMAS, ENTRE EL KM 5 Y EL KM 15, PARA LA
REDUCCIÓN DE SU IMPACTO EN LA VÍA, A PARTIR DEL COSTO
GENERADO POR LA CONGESTIÓN**

**CAMILO ARCILA OSORIO
SIMÓN BETANCUR MESA**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Andrés Pava Restrepo

Especialista y profesor de planta de la UEIA



**UNIVERSIDAD EIA
MOVILIDAD Y TRANSPORTE
ENVIGADO
2019**

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

AGRADECIMIENTOS

Durante la ejecución de este proyecto participaron muchas personas a las cuales queremos darle las gracias porque de alguna forma u otra hicieron esto posible.

En especial, queremos agradecerle a:

Daniel González, por su ayuda incondicional.

Jaime Arcila, Gloria Osorio, Jimmy Conductor, Elisa Gómez, Isabella Jaramillo, Susana Arcila, Sebastián Segovia, Luis Alberto Ruiz, y Liliana Mesa por apoyarnos realizando los aforos vehiculares.

Juan Manuel Gomez, Álvaro Zuluaga y a Jairo Palacio por la información suministrada.

Al grupo de PTV Vissim por permitirnos utilizar una versión de Tesis del software.

A Rubén Hernández, Diana Lady Castaño, y Andrés Pava por su apoyo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

CONTENIDO

	pág.
1. INTRODUCCIÓN	17
2. PRELIMINARES.....	19
2.1. Planteamiento del problema	19
2.2. Objetivos del proyecto	21
2.2.1. Objetivo general	21
2.2.2. Objetivos específicos	22
2.3. Marco de referencia.....	22
2.3.1. Antecedentes	22
2.3.2. Marco teórico	37
3. METODOLOGÍA.....	46
4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	56
4.1. Recolección de datos.....	56
4.1.1. Determinación de las horas pico	56
4.1.2. Aforos de tránsito	59
4.1.3. Anchos de vía	66
4.2. Estructuración del modelo de microsimulación:.....	66
4.2.1. Software	66
4.2.2. Geometría de la vía.....	68
4.2.3. Priorización de la vía	69
4.2.4. Rutas.....	70

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4.2.5.	Comportamiento de los conductores.....	73
4.2.6.	Velocidades de recorrido.....	74
4.2.7.	Áreas de reducción de velocidad	75
4.2.8.	Entradas vehiculares.....	81
4.2.9.	Tiempo total de la simulación.....	84
4.2.10.	Incidentes.....	84
4.2.11.	Variables de calibración	87
4.3.	Análisis de incidentes	90
4.3.1.	Cálculo de exceso de costos por congestión	90
4.3.2.	Resultados obtenidos.....	100
4.4.	Estrategias de atención	121
4.4.1.	Por ubicación y duración.....	121
4.4.2.	Por ahorro de excesos de costos	123
4.4.3.	Optimización del croquis	126
4.4.1.	Evitar los incidentes	127
4.4.2.	Consolidación de estrategias	130
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	133
6.	ANEXOS	142
	REFERENCIAS	143

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Incidentes y tiempos de respuesta y atención en Las Palmas. Fuente: (Centro de Control de Tránsito de Medellín, 2018).	26
Tabla 2. Ejemplo de Formato de Conteo Vehicular. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2009).....	40
Tabla 3. Definición de puntos de aforo. Fuente: Elaboración Propia.	47
Tabla 4. Horas pico evaluadas Fuente: Elaboración propia.....	59
Tabla 5. Puntos aforados. Fuente: Elaboración Propia.....	59
Tabla 6. Ejemplo plantilla de aforo sencillo. Fuente: Elaboración propia.	62
Tabla 7. Ejemplo aforo doble. Fuente: Elaboración propia.	62
Tabla 8. Resumen de los aforos realizados en fin de semana agrupados por sentido. Fuente: Elaboración propia.....	63
Tabla 9. Resumen de los aforos realizados en semana agrupados por sentido. Fuente: Elaboración propia.....	64
Tabla 10. Comparación de Software para Simulaciones de Tráfico. Fuente: (Saidallah et al., 2016).....	67
Tabla 11. Leyenda de la Tabla de Comparación de Software para Simulaciones de Tráfico. Fuente: (Saidallah et al., 2016).	67
Tabla 12. Gradientes utilizados en el modelo. Fuente: Elaboración propia.	69
Tabla 13. Ejemplo numérico de la decisión que puede tomar un vehículo entre seguir ascendiendo por Palmas o tomar el retorno de Baltimore. Fuente: Elaboración propia.....	70
Tabla 14. Velocidades deseadas en el modelo por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia.....	75
Tabla 15. Nombre y descripción de los incidentes simulados. Fuente: Elaboración propia.....	85

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 16. Tiempo promedio de los recorridos en el horario de máxima demanda proporcionado por Google Maps. Fuente: (Google, 2019).....	88
Tabla 17. Tiempos de viaje promedio por tipo de vehículo encontrados en PTV Vissim. Fuente: Elaboración propia.	88
Tabla 18. Resumen de los valores de GEH encontrados para los distintos puntos aforados. Fuente: Elaboración propia.	89
Tabla 19. Tasa de ocupación del vehículo particular. Tomada de (Muñoz Puentes, 2014).....	91
Tabla 20. Movilización y despacho de buses por empresa Fuente: (Consortio Sym, 2013))	92
Tabla 21. Cantidad estimada de personas en las motocicletas observadas. Fuente: (Universidad Privada Domingo Savio, 2013)	94
Tabla 22. Tasas de ocupación por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia. .	94
Tabla 23. Valores del tiempo. Fuente: (Steer Davies Gleave, 2009)	95
Tabla 24. Valor del tiempo. Fuente: (Steer Davies Gleave, 2009)	95
Tabla 25. Valores del tiempo ajustados por inflación y valor promedio del tiempo. Fuente: Elaboración propia.	97
Tabla 26. Resumen de valores subjetivos del tiempo por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia.	97
Tabla 27. Excesos de costos totales para incidentes de dos carriles por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.	107
Tabla 28. Excesos de costos totales para incidentes de un carril por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.	108
Tabla 29. Excesos de costos para los casos más críticos. Fuente: Elaboración propia.....	109
Tabla 30. Excesos de costos para los casos más críticos. Fuente: Elaboración propia.....	110

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 31. Caso más crítico por zona de Las Palmas codificado por colores. Fuente: Elaboración propia.	115
Tabla 32. Valores de la composición de los excesos de costos para el escenario crítico y base. Fuente: Elaboración propia.	119
Tabla 33. Costos sociales por usuario para el caso crítico y base dependiendo del motivo del viaje. Fuente: Elaboración propia.	119
Tabla 34. Resumen de escenarios por tipo de pendiente y gravedad. Fuente: Elaboración Propia.....	121
Tabla 35. Escenarios de incidente con el mayor potencial de ahorro de excesos de costos por disminución del tiempo de obstrucción. Fuente: Elaboración propia. .	124
Tabla 36. Costo de la accidentalidad. Enero a septiembre de 2016. Fuente: (SIMM, 2016).....	127

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Ilustración 1. Recorrido entre el km 5 y km 15 de la vía las Palmas. Fuente: (Google, 2018).....	23
Ilustración 2. Mapa de calor de los incidentes en Las Palmas para el año 2018. Fuente: (Centro de Control de Tránsito de Medellín, 2018).....	25
Ilustración 3. Cámaras de CCTV en Medellín. Fuente: (Daza, 2017)	29
Ilustración 4. Cámaras de Fotodetección en la Avenida Las Palmas. Fuente: (SIMM, s/f).....	30
Ilustración 5. Análisis de datos en Power BI. Fuente: (Marín, 2017).....	31
Ilustración 6. Metodología propuesta. Fuente: (Márquez-Díaz, 2010)	33
Ilustración 7. Tipos de vehículos. Fuente: (ANI, 2016)	38
Ilustración 8. Maniobras posibles en una intersección. Fuente: (ANI, 2016)	39
Ilustración 9. Ejemplo tiempo de recorrido Google Maps. Fuente: (Google, 2018)	56
Ilustración 10. Ejemplo Ruta Google Maps Fuente: (Google, 2018)	57
Ilustración 11. Horas pico sentido descendente Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps (Google, 2018).....	58
Ilustración 12. Horas pico sentido ascendente Fuente: Elaboración propia a partir Google Maps (Google, 2018).....	58
Ilustración 13. Georreferenciación de los puntos aforados Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps (Google, 2018).....	61
Ilustración 14. Priorización de las vías en PTV Vissim. Fuente: Elaboración propia.	70
Ilustración 15. Ejemplo gráfico de la ruta que puede tomar un vehículo siguiendo por Palmas ascendente. Fuente: Elaboración propia.....	72
Ilustración 16. Ejemplo gráfico de la ruta que puede tomar un vehículo al voltear por el retorno de Baltimore. Fuente: Elaboración propia.....	73

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Ilustración 17. Cámara de fotodetección en Chuscalito. Fuente: (Google, 2019) ..	76
Ilustración 18. Ejemplo bolardos flexibles después del retorno de la Candelaria. Fuente: (Google, 2019) ..	77
Ilustración 19. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo. Fuente: Elaboración propia.	78
Ilustración 20. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo zona Baltimore. Fuente: Elaboración propia.....	79
Ilustración 21. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo zona Cola del Zorro. Fuente: Elaboración propia.	79
Ilustración 22. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo zona Balsos. Fuente: Elaboración propia.	80
Ilustración 23. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo zona Candelaria. Fuente: Elaboración propia.	80
Ilustración 24. Reductores de velocidad en un incidente de un solo carril. Fuente: Elaboración propia.	81
Ilustración 25. Perfil de demanda del Estudio de demanda vehicular del Túnel de Aburrá – Oriente para un jueves. Fuente: (Steer Davies Gleave, 2009).....	83
Ilustración 26. Entrada vehicular: volúmenes horarios totales en la simulación. Fuente: Elaboración propia.	83
Ilustración 27. Georreferenciación de los incidentes. Fuente: Elaboración propia.	86
Ilustración 28. Distribución por motivos de viaje. Fuente: (Steer Davies Gleave, 2009).....	96
Ilustración 29. Desglose del precio de la gasolina en Colombia. Fuente: (Diaz 2018) ..	98
Ilustración 30. Excesos de costos para un incidente de dos carriles posterior a Balsos en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.	101

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Ilustración 31. Excesos de costos para un incidente de dos carriles anterior a Balsos en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.	101
Ilustración 32. Excesos de costos para un incidente de dos carriles anterior a la Cola del Zorro en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.	102
Ilustración 33. Excesos de costos para un incidente de un carril posterior a Balsos en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.	102
Ilustración 34. Excesos de costos para un incidente de un carril anterior a Balsos en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.	103
Ilustración 35. Excesos de costos para un incidente de un carril anterior a la Cola del Zorro en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.	103
Ilustración 36. Excesos de costos para un incidente de dos carriles anterior a Balsos en el sentido descendente. Fuente: Elaboración propia.	104
Ilustración 37. Excesos de costos para un incidente de dos carriles posterior a Balsos en el sentido descendente. Fuente: Elaboración propia.	104
Ilustración 38. Excesos de costos para un incidente de un carril anterior a Balsos en el sentido descendente. Fuente: Elaboración propia.	105
Ilustración 39. Excesos de costos para un incidente de un carril posterior a Balsos en el sentido descendente. Fuente: Elaboración propia.	105
Ilustración 40. Excesos de costos de incidentes de dos carriles en sentido ascendente por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.	112
Ilustración 41. Excesos de costos de incidentes de un carril en sentido ascendente por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.	113
Ilustración 42. Excesos de costos de incidentes de dos carriles en sentido descendente por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.	114
Ilustración 43. Excesos de costos de incidentes de un carril en sentido descendente por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.	114

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Ilustración 44. Representación por colores de los casos más críticos por zonas en Las Palmas. Fuente: Elaboración propia.	116
Ilustración 45. Composición de los excesos de costos sociales para el escenario crítico por motivo de viaje. Fuente: Elaboración propia.	118
Ilustración 46. Composición de los de costos sociales para el escenario base por motivo de viaje. Fuente: Elaboración propia.	118
Ilustración 47. Costos sociales por usuario para el caso crítico y base dependiendo del motivo del viaje. Fuente: Elaboración propia.....	120
Ilustración 48. Reducción de costos por incidentes según mayor clasificación de seguridad vial. Fuente: (ITF, 2017)	129
Ilustración 49. Trazado del Túnel de Oriente. Fuente: (V. A. Álvarez, 2017)	135

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Aforos y Análisis de los Aforos.....	142
ANEXO B. Calibración del Modelo.....	142
ANEXO C. Simulación	142
ANEXO D. Resultados de red.....	142
ANEXO E. Cálculos y análisis de costos	142

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

GLOSARIO

ACTORES VIALES: Personas que hacen uso de la vía

HORAS PICO: horario de mayor tráfico vehicular durante el día.

INCIDENTE: colisión entre uno o más actores viales. Se le llama incidente en lugar de accidente para que las autoridades competentes tomen las medidas necesarias e intenten evitarlos en lugar de que parezcan eventos al azar.

PICO Y PLACA: hace referencia a una medida en la cual se restringe la circulación de automóviles particulares en las horas de alto flujo vehicular. Para Medellín, se está aplicando desde el 2005, inicialmente de lunes a viernes en dos horarios para vehículos particulares: de 6:30 am a 8:30 am y de 5:30 pm a 7:30 pm. Para los taxis, se plantearon horarios de 6:30 am a 1:00 pm y de 1:00 pm a 7:30 pm. La medida funciona, restringiendo el tránsito de placas que inicien (en el caso de las motos) o terminen (vehículos particulares y taxis) con un dígito en específico. Si se incumple la norma se penaliza al infractor con 15 salarios mínimos diarios legales vigentes (Arboleda, 2012). Al comienzo, se limitaba a dos dígitos de placa por día para los vehículos particulares y un dígito por día para los taxis. En el 2008 se añadieron las motos de dos tiempos al Pico y Placa. Actualmente, la medida se ha extendido, para los taxis el horario es de 6:00 am a 8:00 pm, para el caso de las motos de dos tiempos la limitación es de dos dígitos cada día, y para los vehículos particulares el Pico y Placa es de cuatro dígitos cada día. Los horarios también cambiaron para las motos y los vehículos particulares, en estos momentos es de 7:00 am a 8:30 am y de 5:30 pm a 7:00 pm (Secretaría de Movilidad, 2018).

Las excepciones a esta norma son: “ambulancias, bomberos, vehículos conducidos por discapacitados, vehículos destinados al control del tráfico, funerarios, carros de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

valores, de transporte de alimentos, recolectores de basura, motocicletas de servicio público o particular, vehículos con blindaje igual o superior a nivel 3” (Arboleda, 2012) y vehículos que funcionen con gas natural.

Respecto a sus efectos, se observa una tendencia a disminuir el flujo vehicular en un 10% en las horas pico, pero aumentando el flujo vehicular en las horas valle en un 8% (Posada, John Jairo; Farbiarz, Viviana; González, 2010). Además, concluyen que es una medida temporal, que está causando un incremento al parque automotor al motivar a los ciudadanos a tener dos autos o más. Sin embargo, otros autores como Juan Manuel Gómez (2019) creen que este incremento al parque automotor motivado por el Pico y Placa no es significativo.

Finalmente, es importante resaltar que en períodos de gran contaminación atmosférica se han tomado medidas adicionales denominadas como "Pico y Placa Ambiental", con medidas más estrictas como lo fueron el sábado 24 de febrero, en el cual se restringieron las placas finalizando (en el caso de los carros particulares, camiones y volquetas) e iniciando (en el caso de motos de dos y cuatro tiempos) en números impares, durante los horarios establecidos de lunes a viernes. Para el caso de los camiones y volquetas de modelos anteriores a 2009 se extendieron los horarios de 5:00 am a 8:30 am y de 4:30 pm a 9:00 pm (Carvajal Restrepo, 2018). Según Mateo Vahos (2018) estas medidas en febrero de 2018 lograron reducir 18 de 20 estaciones de medición de la contaminación del aire de un ICA naranja a amarillo.

TIEMPO DE ATENCIÓN: tiempo entre la ocurrencia del incidente y el momento en que las entidades de emergencia se retiran del incidente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

TIEMPO DE NORMALIZACIÓN DEL FLUJO: hace referencia al tiempo entre la ocurrencia del incidente y el momento en el que el flujo de la vía vuelva a condiciones normales, sin congestiones adicionales.

TIEMPO DE OBSTRUCCIÓN: es el tiempo entre la ocurrencia del incidente y el momento en que se remueve la obstrucción de la vía.

TIEMPO DE RESPUESTA: hace referencia al tiempo entre la ocurrencia del incidente y el momento en que llegan los servicios de emergencia. En otras palabras, es el tiempo que se demoran los servicios de emergencia en llegar al lugar de los hechos.

TIEMPO TOTAL DEL INCIDENTE: para este proyecto, se entiende como tiempo de total del incidente, al tiempo transcurrido entre el incidente o bloqueo y la normalización del flujo de la vía. En otras palabras, incluye: tiempo de reporte del incidente; tiempo de análisis en la línea de emergencia y tiempo que se demoran en dar las instrucciones a los equipos de emergencia; tiempo que toman los equipos de emergencia en llegar al lugar de los hechos; tiempo en atender el incidente; y tiempo adicional necesario para que se normalice el flujo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ABSTRACT

In 2018, Medellín ranked first in Colombia regarding traffic collisions with 41,667 (Osorio, 2018). One of the most critical cases is the Las Palmas Avenue, reporting 147 incidents in less than four months of 2018 which resulted in a total of three deaths and 49 injured people (Benincore, 2018). With the relationship between Aburrá Valley and San Nicolás Valley narrowing, and the Las Palmas Avenue being one of the four roads that connects these territories, it is clear the important role that this Avenue plays.

Considering what was already stated, this document calculates the excess in costs between a base scenario and a scenario in which there is an incident, using existing methodologies to achieve its objectives. The costs evaluated were divided into three main categories: social costs associated with opportunity cost, operating costs and pollution costs. With this information, incident attention strategies are formulated.

This study was divided into 4 important milestones: gathering information that will serve as a main input, micro simulation and calibration of a base model in PTV Vissim, simulation and analysis of incidents in different points of the road network, and proposing incident attention strategies relevant to the simulated network.

It was determined that most critical segments in terms of excess costs in Las Palmas were the high sections of the avenue: in the upwards direction, the segments after Cola del Zorro and also after Los Balsos, and in a downwards direction the segment before Los Balsos. The allocation of several transit agents in the CAI's roundabout would help by attending these segments quickly and in this way diminishing excess costs.

Keywords: Traffic Collisions, Congestion, Economic impact, Incident attention strategies, microscopic traffic flow simulation

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

1. Introducción

Medellín ocupó el primer lugar a nivel nacional en 2018 en cuanto a número de incidentes de tránsito con 41.667 (Osorio, 2018). Uno de los casos más críticos es la Avenida Las Palmas la cual en menos de 4 meses en el 2018 presentó 147 incidentes de tránsito, que dejaron tres personas fallecidas y 49 lesionadas (Benincore, 2018). La importancia de la vía Las Palmas se debe a que es una de las 4 vías que conecta el Valle de Aburrá con el Valle de San Nicolás, y es una de las opciones para movilizarse al oriente, además las relaciones entre estos dos territorios se han venido estrechando y creciendo con gran rapidez en los últimos 30 años.

Teniendo en cuenta lo relevante que es esta vía, este documento se apoya en metodologías existentes para calcular los excesos en los costos entre un escenario base y un escenario en el cual se tiene un incidente. Los costos evaluados fueron divididos en tres categorías: costos sociales asociados al costo de oportunidad, costos de operación y costos por contaminación. Con esta información se proponen estrategias de atención de incidentes.

El estudio se dividió en 4 hitos importantes: recolección de información que será utilizada como insumo principal, micro simulación y calibración de un modelo base en PTV Vissim, simulación y análisis de incidentes en distintos puntos de la malla vial, y el planteamiento de estrategias de atención para mitigar los costos generados por la congestión.

Se determinó que los segmentos más críticos en términos de excesos de costos en Las Palmas fueron los segmentos altos de la vía: en sentido ascendente posterior a la Cola del Zorro y también el segmento posterior a Los Balsos, y en sentido descendente anterior a Los Balsos. Se recomendó la ubicación de varios agentes

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

de tránsito en el retorno del CAI para atender rápidamente estos segmentos y de esta manera disminuir los excesos de costos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2. Preliminares

2.1. Planteamiento del problema

En las últimas décadas se ha incrementado el nivel de motorización en el Valle de Aburrá, 182% desde el 2005 (AMVA, s/f). Al igual, es importante notar que hay áreas que se han desarrollado más que otras, por ejemplo, el desarrollo en curso del Oriente antioqueño lo ha llevado a considerarse un brazo del Valle de Aburrá, puesto que tuvo un aumento del 500% en venta inmobiliaria (V. A. Álvarez, 2016).

Como consecuencia de lo anterior, de acuerdo con un estudio realizado por INRIX (2017), el cual se enfoca en los vehículos particulares, estimó que las condiciones más críticas en cuanto a congestiones en Colombia se encuentran en Bogotá, sin embargo, los medellinenses pasan en promedio cincuenta y siete horas al año en congestiones, posicionando a Medellín en el puesto número veintitrés entre las 1360 ciudades a nivel mundial las cuales se tuvieron en cuenta en esta investigación. Según Chang & Xiang, (2003) un aumento de la congestión trae consigo una mayor probabilidad de que haya una mayor frecuencia de incidentes de tráfico.

Las congestiones vehiculares se dividen en dos grupos principales, las congestiones recurrentes y las congestiones no recurrentes. Las congestiones recurrentes están caracterizadas por la saturación vial. Mientras que, las congestiones no recurrentes se deben en mayor parte a incidentes de tránsito. Para ponerlo en perspectiva, se estima que el 18% del tiempo que duran los vehículos en congestión es ocasionado por la accidentalidad en las vías (Pieters, 2017). Es importante notar que esta cifra varía dependiendo de la vía y el nivel de accidentalidad de esta, por lo que en el caso la vía las Palmas, que es la 6ta vía más peligrosa del país (Herrera, 2018), se estima que el tiempo invertido en una congestión a causa de un incidente es mayor al mencionado.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

El área de estudio se enfocará en la vía Las Palmas, específicamente entre el km 5 y el km 15. Luego del km 5 de la doble calzada de las Palmas a la altura del Country Club, la vía deja de comportarse como una vía urbana ya que la zona se vuelve menos residencial en donde las congestiones se dan principalmente de forma no recurrente. Esto sumado a que tiene dos accesos principales desde el km 5 hasta el km 15, limita el uso de rutas alternativas luego de tomar esta vía agravando aún más la congestión en caso de un incidente de tránsito. Finalmente, el comportamiento de la culminación de la vía está regulado por una glorieta, donde luego se divide en dos vías de una sola calzada, esto último se sale del alcance de este estudio porque la dinámica que ejerce el comportamiento de la vía se diferencia a la de Las Palmas.

Por otro lado, es necesario reconocer, que estos incidentes tienen un costo. El costo anual causado por la congestión vehicular en Colombia según la revista Dinero (2014) es de 3,9 billones de pesos, cifra que considera factores directos tales como el costo de oportunidad de la persona involucrada en esta congestión, costos asociados a las emisiones producidas y el impacto social de las mismas; y, a su vez, involucra costos indirectos concernientes al aumento del precio de los productos (Cookson & Pishue, 2017).

Esto es importante pues la vía de las Palmas es una de las 4 vías que conecta el Valle de Aburrá con el Valle de San Nicolás. En el valle de San Nicolás se encuentra el aeropuerto internacional José María Córdova, además de múltiples instituciones educativas como la Universidad Escuela de Ingeniería de Antioquia. Adicionalmente, según Belt & Bruner PC, (2017), se estima que el 20% de todos los incidentes de tráfico tendrán un incidente secundario causado por: obstrucciones en los carriles, escombros, derrames de aceite o gasolina, vehículos que no mantienen una distancia prudente, entre otras causas. Las probabilidades de ocurrencia de un incidente secundario aumentan 2.8% con cada minuto que el incidente principal

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

continúe siendo un obstáculo. Es evidente que, en caso de un incidente en Las Palmas, es necesario aliviar el bloqueo al flujo lo más rápido posible, y así mitigar el impacto económico y ambiental de la congestión, y disminuir las probabilidades de un nuevo choque.

Se reconoce que las alcaldías de Medellín y Envigado han venido trabajando en la creación de proyectos que buscan mejorar los tiempos de atención. El más reconocido es el Sistema Inteligente de Movilidad de Medellín, el cual busca cumplir este objetivo recolectando, procesando y analizando datos del tráfico (Secretaría de Movilidad, 2013). Sin embargo, con eventos como el del 15 de marzo del 2018, en donde un choque múltiple en el Km 13 de la Doble Calzada Las Palmas generó una congestión de más de 5 kilómetros, se observa que la problemática sigue latente (H13N, 2018).

De este modo, surge la siguiente pregunta ¿Qué conclusiones se obtendrían al realizar un análisis del costo de congestiones en la vía las Palmas entre el km 5 y el km 15, a través de la formulación de casos de estudio que permitan observar la variación del costo a medida que el tiempo total de obstrucción aumenta, dependiendo si es un incidente de uno o dos carriles, el punto del incidente y el sentido en donde se genera?

2.2. Objetivos del proyecto

2.2.1. Objetivo general

- Identificar estrategias para mitigar el impacto de los incidentes de tránsito en vía Las Palmas, ente el km 5 y el km 15, a partir del costo generado por la congestión.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.2.2. Objetivos específicos

- Estimar el volumen vehicular en la doble calzada las Palmas entre el km 5 y el km 15 en las horas de máxima demanda, haciendo uso de información primaria por aforos vehiculares, generando así insumos para iniciar la modelación.
- Simular bloqueos sobre un modelo de microsimulación de tráfico para medir los tiempos y colas en congestión.
- Determinar y evaluar los costos por una congestión en el trayecto de estudio a partir de los resultados del modelo, considerando el costo de oportunidad, el costo del combustible desperdiciado, los costos sociales de las emisiones y el desgaste del vehículo para distintos tipos de bloqueo en distintas partes de la vía.
- Proponer estrategias para la reducción del tiempo total del incidente en el área de estudio a partir de la relación costo – duración de la congestión.

2.3. Marco de referencia

2.3.1. Antecedentes

2.3.1.1. Ubicación

Según Google Maps, la doble calzada de la Avenida las Palmas tiene una longitud de 16.9 km. Entre el km 5 y el km 15 se tienen tan solo 2 accesos principales, La Cola del Zorro y Los Balsos, vistos en la Ilustración 1 subrayados de izquierda a derecha respectivamente. Adicionalmente, se ha observado que el flujo en este trayecto es más estable y en un gran porcentaje, las congestiones son causadas incidentes. Por otro lado, el flujo de peatones es mínimo, lo que permite descartar esta variable en la simulación. A continuación, en la Ilustración 1 se observa la zona limitada para el proyecto.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

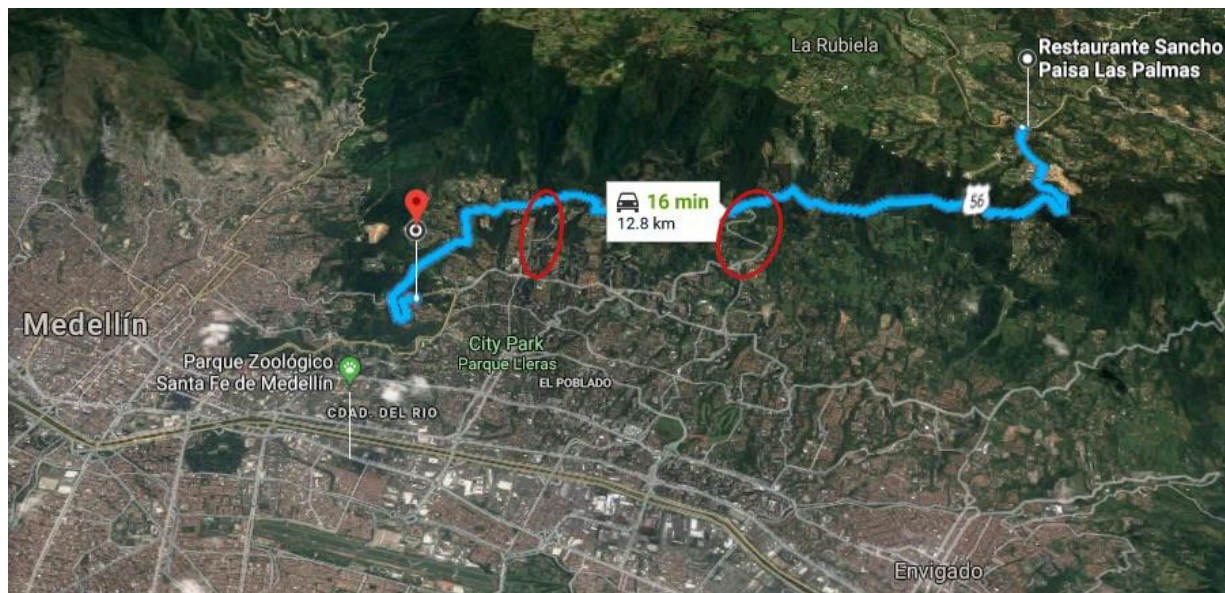


Ilustración 1. Recorrido entre el km 5 y km 15 de la vía las Palmas. Fuente: (Google, 2018).

2.3.1.1.1. Factores asociados a los incidentes

La doble calzada las Palmas, además de ser una de las vías principales que conecta el Valle de Aburrá con el Oriente antioqueño, es una de las vías con más alta accidentalidad de la región (Montoya, 2018). Según Gustavo Cabrera, experto en seguridad vial, en una entrevista con el Colombiano (2018): las curvas pronunciadas de la vía y que las personas no conduzcan siguiendo los límites de velocidad permitidos, tienen un gran impacto en la accidentalidad de la vía. Para el ingeniero Mario Santiago Hernández, en otra entrevista con el Colombiano (2018), opina que el problema de Las Palmas es de velocidad de diseño: “La norma técnica que regía en ese entonces (cuando se diseñó Las Palmas), la de 1998, precisa que la velocidad de diseño es de 80 kilómetros por hora y las curvas debe ser de un radio de 230 metros. Pero hoy el límite en Las Palmas es de 60 kilómetros y sus curvas no alcanzan dicho radio”. Los vehículos están alcanzando una velocidad mayor a la permitida en la vía, mientras el diseño de las curvas no es el idóneo y por ello se generan las invasiones de carril, los volcamientos y demás incidentes. Entre enero

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

y agosto de 2018 se registraron 318 incidentes con 122 heridos y cuatro víctimas fatales (Herrera, 2018). De acuerdo con los altos índices de accidentalidad, los costos que los usuarios experimentan debidos a la congestión aumentan, y si los tiempos de atención no son razonables, este costo es mucho mayor, por esta razón se deben establecer estrategias de atención.

2.3.1.1.2. Incidentes en Las Palmas

En la Ilustración 2 se muestra el mapa de calor de los incidentes presentados en palmas para el año 2018, la mayor concentración de accidentes se presenta al inicio de la Av. Las Palmas, cerca de la Glorieta de San Diego, el tramo entre las carreras 38 y 25 y en los limites cerca de la carrera 10 (Centro de Control de Tránsito de Medellín, 2018), pero este punto crítico se sale del alcance del estudio. El punto de mayor accidentalidad para el 2018, dentro del alcance del estudio, se presenta a la altura del CAI.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

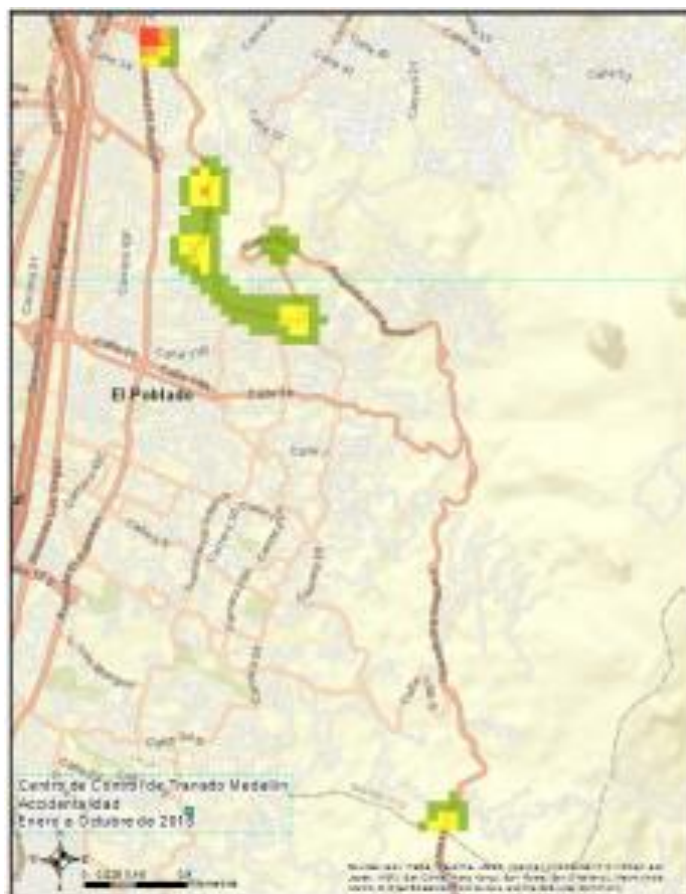


Ilustración 2. Mapa de calor de los incidentes en Las Palmas para el año 2018. Fuente: (Centro de Control de Tránsito de Medellín, 2018).

Desde el primero de enero hasta el 30 de septiembre del 2016, se registraron 427 incidentes en la Avenida Las Palmas; de estos incidentes 252 correspondían a solo daños, 170 incidentes con lesionados y 5 incidentes con muertes (SIMM, 2016), generando unos costos socioeconómicos de 10,436 millones de pesos, calculados con costos de referencia para Colombia de incidentes con sólo daños, heridos y muertos, tomados del estudio Desarrollo Metodología de valoración del costo económico de la accidentalidad vial en Colombia, referenciado en el título 2.3.1.4.1 *Metodología para valorar los costos externos de la accidentalidad en proyectos de transporte* (Márquez-Díaz, 2010).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En el 2018, se presentaron 521 incidentes en Las Palmas; de estos incidentes 384 correspondían a solo daños, 132 incidentes con lesionados y 5 con muertes (Centro de Control de Tránsito de Medellín, 2018), en la Tabla 1 se presenta los promedios de tiempo de respuesta y de atención de los agentes de tránsito a aquellos incidentes mencionados. Es importante resaltar que el tiempo de atención no necesariamente significa que se haya restablecido el flujo normal, sino que significa el tiempo en el que se concluyó la atención del agente de tránsito, el tiempo de obstrucción pudo haber sido mayor o menor a este.

Tabla 1. Incidentes y tiempos de respuesta y atención en Las Palmas. Fuente: (Centro de Control de Tránsito de Medellín, 2018).

TIPO	CANTIDAD	T RESPUESTA	T ATENCION
Accidente transito solo daños	384	0:15:00	0:35:33
Lesiones accidente transito	132	0:21:54	1:27:46
Muerte Accidente de transito	5	0:19:32	3:09:26
Total general	521	0:16:47	0:50:16

Estos incidentes generan bloqueos en los carriles los cuales afectan las condiciones de flujo normales de la vía, causando congestiones que se pueden ver agravadas por la hora pico. En el 2016, una volqueta y un bus colisionaron pasadas las 7:30 de la mañana, en la Avenida Las Palmas, Kilómetro 9, en inmediaciones al Colegio New School, lo cual generó una congestión de más de dos horas. “Hasta el sector llegaron agentes de la Secretaría de Movilidad de Medellín, quienes atendieron el hecho y se encargaron de restablecer la circulación vial en la zona que fue habilitada de nuevo pasadas las 10:45 de la mañana” (Bustamante, 2016). Otra gran congestión se vivió el 15 de marzo del 2018, en donde un choque múltiple en el Km 13 de la Doble Calzada Las Palmas generó una congestión de más de 5 kilómetros (H13N, 2018). Para poder atender estos incidentes los agentes de tránsito toman medidas para garantizar el flujo si las condiciones de la vía lo permiten, como por ejemplo, en octubre del 2018: cuando el conductor de un camión falleció luego de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

accidentarse en la Avenida Las Palmas en el kilómetro 8 + 100; el carril de descenso se encontraba cerrado mientras las autoridades realizaban el procedimiento judicial, por esta razón la movilidad se encontraba restringida y los dos carriles de la vía de ascenso fueron habilitados para atender el flujo en las dos direcciones (Vivir en el Poblado, 2018).

2.3.1.2. Estrategias de atención a incidentes en el mundo

Cuando ocurren incidentes en las autopistas interestatales de Estados Unidos, especialmente cuando hay heridos, se tratan como escenas de un crimen. La primera responsabilidad de la policía después de proporcionar cuidado médico a los heridos es preservar cualquier tipo de evidencia con respecto al incidente y proteger la seguridad de los servicios de emergencia, pues si se permite el flujo vehicular, se pone en riesgo la seguridad de los servicios de emergencia y la integridad de la evidencia (Hunter, 2017). El tiempo promedio de respuesta en Estados Unidos es de 15 minutos 19 segundos (AutoInsurance Center, s/f), pero esto solo mide el tiempo que se demora los organismos de emergencia en llegar a la escena, y no el tiempo total hasta la reanudación normal del flujo, por tal razón es importante definir su efecto, y a partir de allí definir como reducirlo.

2.3.1.3. SIMM

El Sistema Inteligente de Movilidad de Medellín (SIMM) nace por la necesidad de optimizar la red vial de Medellín. Actualmente, SIMM lo conforman tres empresas, UNE, Sistemas Inteligentes en Red (SIR) y Quipux, todas actuando con la colaboración de Secretaría de Tránsito de Medellín. El contrato con estas empresas fue firmado por la Alcaldía de Medellín en el 2006 y tiene vigencia hasta el 2025; en este contrato también se especificó que el 70% de lo recaudado por las foomultas va a ser distribuido entre estas 3 empresas y el 30% le corresponde a la Secretaría de Movilidad (Zambrano, 2017). La idea es recolectar, procesar y

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

analizar datos de tráfico para elaborar estrategias de descongestión, mejorar el tiempo de respuesta y mejorar la accidentalidad vial. Todo esto se traduce en una disminución de costos tanto para los usuarios de la vía y la sociedad en general. Para lograr el objetivo, el SIMM divide sus recursos en cámaras de fotodetección, cámaras de circuito cerrado de televisión (CCTV), paneles informativos, Web 2.0, optimización de semáforos, y el centro de control de tránsito (CCT).

Las cámaras de fotodetección, tienen como objetivo principal el de filmar videos y fotografías para determinar una posible infracción de tránsito. Estos datos, sirven como evidencia que luego es analizada por agentes de tránsito para validar comparendos digitales, los cuales por el momento están limitados a: “cruces de semáforo en rojo, invasión de la cebrada, circulación en pico y placa, exceso de velocidad, vehículos de más de 3,5 toneladas transitando por el carril izquierdo, y SOAT y Revisión Técnico vencidas” (Secretaría de Movilidad, 2013). Además, afirman que las 40 cámaras que se tienen en la actualidad ayudan con la detección de infracciones y también a realizar aforos de tránsito. Éstos se hacen a partir de los lazos inductivos que se encuentran en la vía, los cuales detectan la cantidad de material metálico que los cruza, y con esto es capaz de categorizar los vehículos. Esta información luego es transferida con un retraso de 6 minutos al centro de control de tránsito para ser analizada y procesada. Se estima que cada mes, pasan 26 millones de vehículos por dichos lazos inductivos, de los cuales el 0,2% resulta en infracción. Además, se consta de varias unidades móviles, sin embargo, estas no hacen aforos de tránsito.

En este momento hay 80 cámaras de CCTV operadas desde el CCT para detectar anomalías en el flujo de tránsito. Éstas automáticamente detectan colisiones, mediante un sistema llamado la Detección Automática de Incidentes (DAI). Por otra parte, también hacen aforos de tránsito los cuales separan el conteo por carriles y

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

categorizan los carros. Un ejemplo del software en el que se analiza las grabaciones tomadas por esta cámara se observa en la Ilustración 3.



Ilustración 3. Cámaras de CCTV en Medellín. Fuente: (Daza, 2017)

Para el caso específico de la avenida las Palmas, se tienen únicamente dos cámaras de fotodetección. Una de ellas se encuentra dentro de la zona analizada en el proyecto, a la altura de Chuscalito. A continuación, en la Ilustración 4 se observa la georreferenciación de estas cámaras.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 4. Cámaras de Fotodetección en la Avenida Las Palmas. Fuente: (SIMM, s/f).

El CCT, se encarga de coordinar todo el SIMM, lo cual requiere de monitoreo permanente para planear, operar y analizar la movilidad. Adicionalmente, se realizan estudios que apoyan a la Secretaría de Movilidad de Medellín. Todo se hace a través de una interfaz que georreferencia la información y en caso de que haya algún problema en una de las partes del sistema, automáticamente se detecta. Toda la información se recopila Power BI y Aimsun. En la Ilustración 5 se observa una de las formas en que se puede analizar los datos en Power BI. Por el momento se tienen datos desde el 2012, y en el futuro se piensa que con el proyecto OpenData de la Alcaldía de Medellín, se logre el acceso de todo el público a todos estos datos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

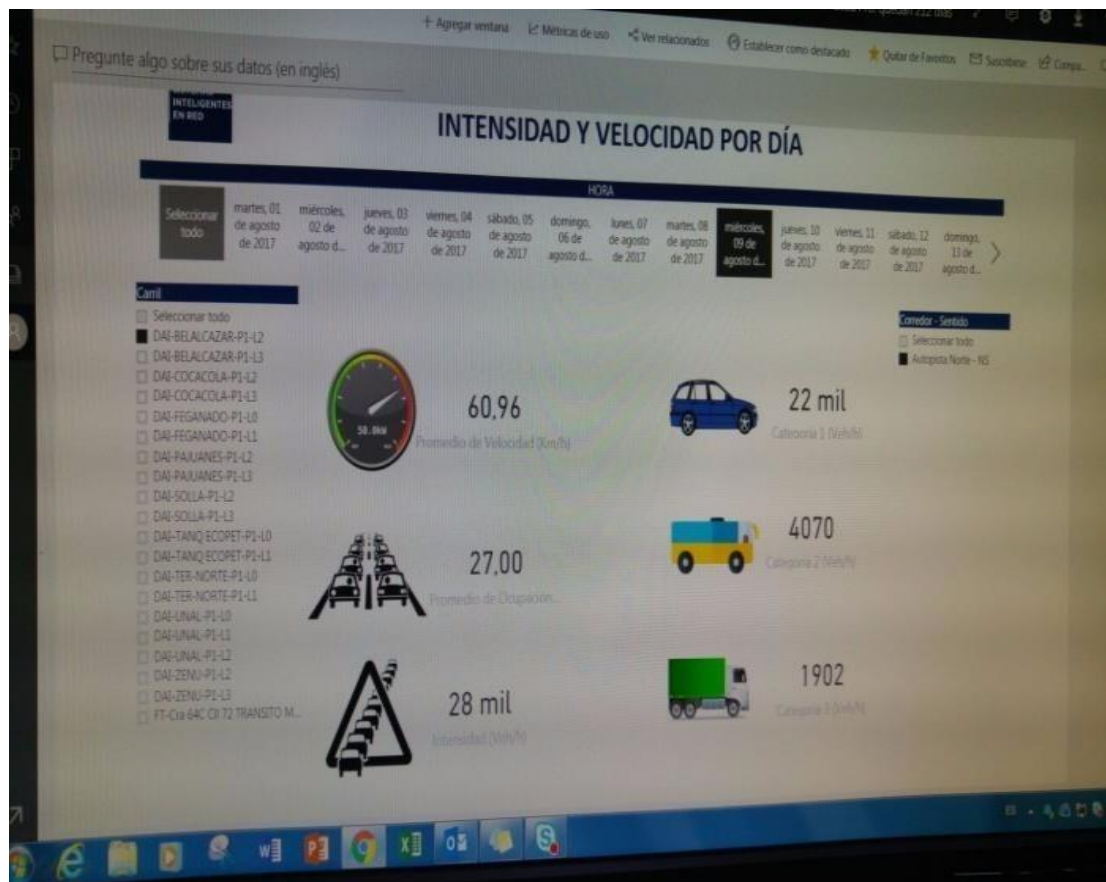


Ilustración 5. Análisis de datos en Power BI. Fuente: (Marín, 2017).

Por otra parte, el SIMM también cuenta con dos estrategias para informar a la comunidad de los datos recolectado. El primero es con paneles informativos, los que generan alertas para los conductores, informándoles de rutas alternas para optimizar la movilidad. Éstos no se prenden permanentemente para evitar una condición que en la psicología es conocida como “el efecto ceguera”. El segundo es la Web 2.0 que son reportes en tiempo real del estado de las vías por parte de la Secretaría de Movilidad de Medellín mediante Twitter, Facebook, Youtube y Flickr para que los conductores tomen decisiones inteligentes. Actualmente todo esto se maneja en el CCT.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La información fue recolectada, mediante a una entrevista con Milton González (2017) funcionario de UNE, Edwin Daza (2017) funcionario de Quipux y Esteban Marín (2017) funcionario de SIR.

2.3.1.4. Estudios

2.3.1.4.1. Metodología para valorar los costos externos de la accidentalidad en proyectos de transporte (Márquez-Díaz, 2010).

- **Objetivos:** Formular una metodología para mejorar la valoración de los costos externos de la accidentalidad en la evaluación económica de proyectos de transporte.
- **Metodología:** Se revisan las causas, las variables y las acciones determinantes en la accidentalidad de tránsito; se esbozan algunas técnicas de pronóstico, y se hace un planteamiento para calcular los costos totales y marginales. Se propone valorar el costo externo de la accidentalidad de tránsito según el análisis de las estadísticas y la identificación de las causas y variables relevantes según el tipo de proyecto de transporte que se vaya a evaluar.
- **Resultados:** Se propone valorar el costo externo de la accidentalidad de tránsito siguiendo el proceso mostrado en la Ilustración 6, comienza por un lado del análisis de las estadísticas de accidentalidad existentes así poder identificar las causas más probables y las variables más relevantes en función del tipo de proyecto que se pretenda evaluar, y por el otro lado, de la identificación de las características técnicas e impactos del proyecto, para poder concluir en la valoración del impacto para el asegurador, la víctima y la sociedad.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

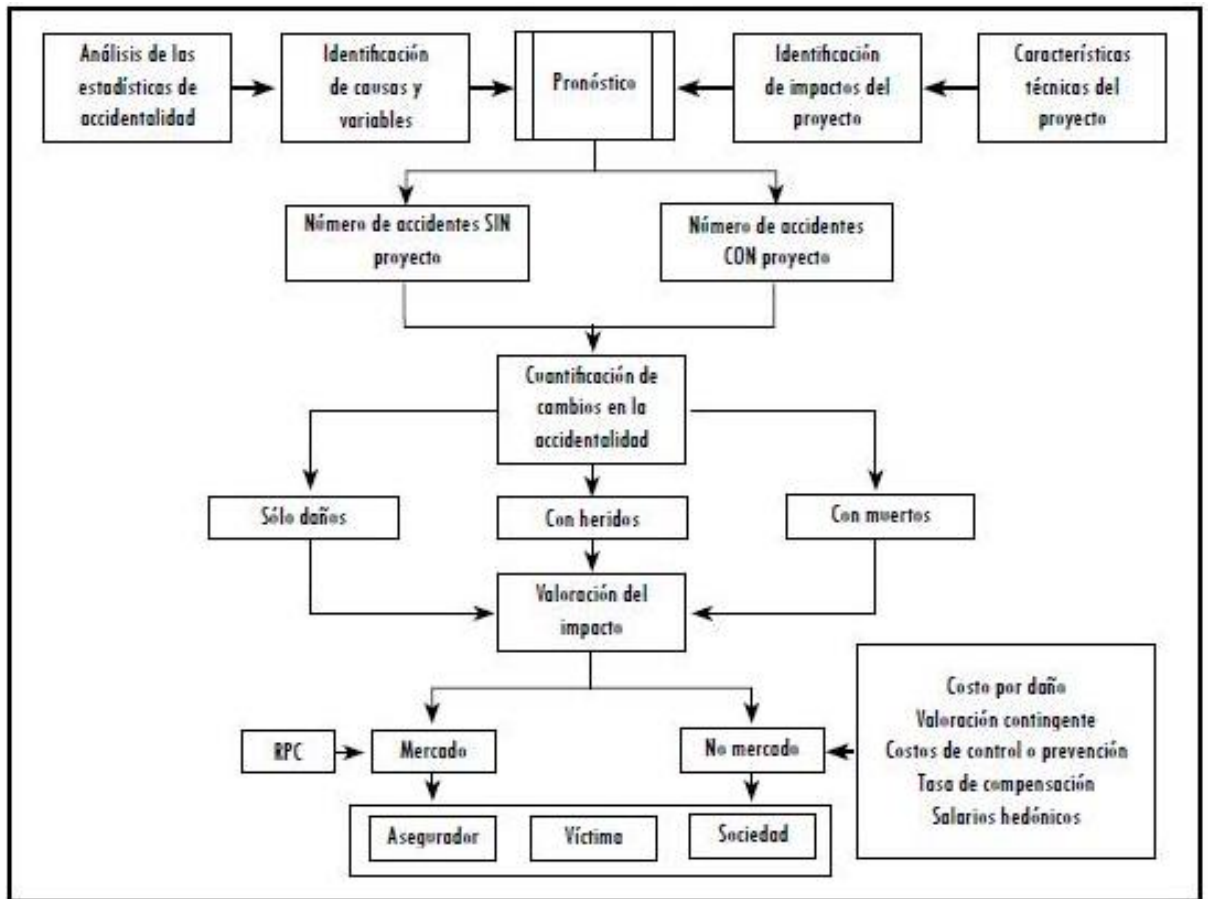


Ilustración 6. Metodología propuesta. Fuente: (Márquez-Díaz, 2010)

- Conclusiones: “Para aplicar correctamente la metodología propuesta se debe mejorar el registro de las estadísticas nacionales y la identificación de las causas de incidentes. Finalmente, se recomienda incluir en el análisis la pérdida de bienestar causada por el riesgo de morir en un incidente tránsito, así como el costo social y los costos morales causados por estas muertes” (Márquez-Díaz, 2010).

Esta metodología no se tuvo en cuenta para el desarrollo de este trabajo por la razón de que estaba muy enfocada en la cuantificación de los costos de los incidentes como tal, incluyendo los daños materiales y la pérdida de la vida. La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

humana. Mientras que el presente estudio se enfoca en la identificación de los costos asociados a las congestiones producidas por la accidentalidad. Además ya se contaba con diversos estudios con cifras de estas características que también se referencian en este estudio, tal como (SIMM, 2016).

2.3.1.4.2. Analyzing the response to traffic accidents in Medellín, Colombia, with facility location models (Castañeda & Villegas, 2017).

- **Objetivos:** Determinar el número de ambulancias requeridas para servir los implicados en incidentes de tránsito reportados al número de emergencia, y determinar su ubicación apropiada (según a la distribución geográfica y temporal de la demanda estimada obtenida de información histórica) y así maximizar los eventos cubiertos por este servicio.
- **Metodología:** Las metodologías usadas para ubicar sistemas de emergencia se pueden dividir en dos categorías: modelos probabilísticos que usan simulación, o teoría espacial de colas y modelos de ubicación de facilidades. Para poder maximizar la capacidad de respuesta del sistema, estos modelos asumen un tiempo de respuesta máximo para medir la calidad de la atención a los eventos reportados. Este tiempo máximo produce una distancia de cobertura en donde una ambulancia es ubicada en un punto específico. Eventos dentro de esta zona de cobertura se consideran bien cubiertos, mientras que los eventos atendidos por ambulancias fuera de su distancia de cobertura se consideran como mal cubiertos.
- **Resultados:** El modelo resultante (SCLP + MEXCLP) combina los elementos del problema de ubicación de cobertura del conjunto y el problema de ubicación de cobertura máxima prevista. El uso de datos históricos en este modelo demuestra que el sistema puede proveer un mejor servicio si se incrementa el tamaño de la flota de ambulancias. Sin embargo, la alternativa de mover las

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ambulancias de las estaciones de bomberos a otros lugares de la ciudad no resulta en mejoras del servicio. Adicionalmente, reducir el número de estaciones de bomberos usadas como bases de despacho, pero incrementando la flota también puede proveer un nivel aceptable de servicio para este sistema.

- Conclusiones: El uso de estos modelos iluminó la discusión de este problema y ayudó a las autoridades locales de Medellín para evaluar objetivamente el impacto de diferentes cursos para el mejoramiento. También se muestra lo simple que pueden ser las herramientas clásicas de Investigación de Operaciones para apoyar la evaluación de medidas de mejora comprendidas en la década de acción de las Naciones Unidas sobre seguridad vial. Estudios futuros posibles pueden incluir el uso de modelos de simulación/optimización para evaluar los escenarios propuestos y el uso de modelos espaciales de colas para refinar las estimaciones dadas por modelos de ubicación simples.

Este estudio servirá como referencia para la elaboración de las estrategias de atención del presente estudio, desarrolladas en el título *4.4 Estrategias de atención*.

2.3.1.4.3. Metodología para evaluar los sobrecostos por congestión vehicular en la malla vial arterial principal de la ciudad de Bogotá D.C. (Muñoz Puentes, 2014)

- Objetivo: Definir una metodología para evaluar los sobrecostos sociales por congestión vehicular en la malla vial arterial principal de la ciudad de Bogotá D.C. por medio de una microsimulación de diversos escenarios.
- Metodología: Se comenzó por la caracterización de los corredores viales y el análisis de información: definiendo el área de influencia, inventario vial y el procesamiento, evaluación y análisis de volúmenes y velocidades de recorrido. Luego, se procedió con la estructuración del modelo de microsimulación, utilizando el software PTV Vissim se ingresó la información

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

recolectada para la simulación de los escenarios reales e ideales dando como resultado los indicadores de la red. Para el cálculo de los sobrecostos sociales por la movilización y congestión vehicular, se determina la diferencia entre los costos de movilización de la situación real y la ideal. Para el cálculo de los costos sociales de ambos escenarios se acudió a definir fórmulas matemáticas empíricas, deducidas de las fórmulas presentadas por el trabajo de Rebasté, Monzón, & Sarmiento (1999) en “Una metodología simple para estimar los costes derivados de la congestión del tráfico en ciudades. Aplicación a Madrid y Barcelona”. Finalmente, determinaron los costos sociales de movilización y de la congestión vehicular ingresando los indicadores de la red en las ecuaciones empíricas. Este estudio solo consideró pertinente el cálculo de los costos asociados al tiempo dado que según Rebasté, Monzón, & Sarmiento (1999), éstos “abarcan cerca del 90% del total de dichos costos generados por la congestión, mientras que los costos de operación – que incluyen combustibles, lubricantes, manutención y desgaste de neumáticos se acercan al 10%” y “el aumento de los costos de contaminación suponen una contribución muy pequeña en la consideración de los costos derivados de la congestión del tráfico urbano”.

- Resultados: El sobrecosto de la congestión vehicular es de 164,111,756,832.00 COP para un área que representa un 9.5% del total de la malla vial. El ahorro en términos de costos de movilización cuando se realizan actividades de mejora semafórica para el tramo objeto del análisis es de 18,700,117,585 COP al año, y el ahorro en términos de costos de congestión vehicular, es de 20,293,296,201 COP. El ahorro en términos de movilización cuando se realizan inversiones para construcción de infraestructura es de 21,764,941,477 COP al año, y el ahorro en términos de costo de congestión vehicular es de 24,261,578,492 COP al año. Este

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

resultado no nos aplica, ya que este análisis que se hace es de la congestión derivada del volumen vehicular, y no de los siniestros o accidentes viales, pero la metodología propuesta es aplicable al presente estudio.

- Conclusiones: El sobre costo de la congestión vehicular antedicho es mayor que el recurso destinado anualmente para el mantenimiento del 29% de las vías de Bogotá. Cuando se ejecutan acciones que busquen reducir la congestión vehicular, como es el caso de: mantenimientos viales, mejoras geométricas, sincronización semafórica o en el mejor de los casos la construcción de infraestructura se puede llegar a obtener beneficios de un 82% de las condiciones actuales, en términos de ahorros en los costos de congestión vehicular.

Esta metodología fue seleccionada para la determinación de los excesos de costos establecidos en los objetivos. Su presentación y desarrollo se encuentran en el título 3. *METODOLOGÍA* y 4.3.1. *Cálculo de exceso de costos por congestión*, respectivamente.

2.3.2. Marco teórico

2.3.2.1. Aforo vehicular

Un aforo vehicular se trata de un conteo de vehículos que presenta información clave para un estudio de demanda de carreteras, el tipo de pavimento que se debe usar y para la toma de decisiones que afecten la movilidad como tal. Los aforos vehiculares transmiten información mediante estadísticas basadas en volúmenes y densidades de tránsito, los cuales se explican como el número de vehículos que pasa por un punto en un periodo de tiempo determinado y el número de vehículos que ocupan una unidad de longitud determinada en un tiempo establecido.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A los vehículos contados se les hace una clasificación del tipo de vehículo que está circulando por la vía como se ve en la Ilustración 7. Adicionalmente, se consideran las posibles maniobras en las vías, en la Ilustración 8, se observan las de una intersección.



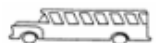







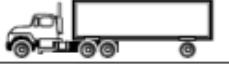


TIPO DE VEHICULO		ESQUEMA
AUTOS		
BUSES	BUSETA	
	BUS	
	BUS METROPOLITANO	
C2-P	CAMION DE DOS EJES PEQUEÑO	
C2-G	CAMION DE DOS EJES GRANDE	
C3 Y C4	CAMION C3	
	CAMION C4	
	TRACTO-CAMION C2-S1	
	TRACTO-CAMION C2-S2	
	TRACTO-CAMION C3-S1	
C5	TRACTO-CAMION C3-S2	
> C5	TRACTO-CAMION C3-S3	

Ilustración 7. Tipos de vehículos. Fuente: (ANI, 2016)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

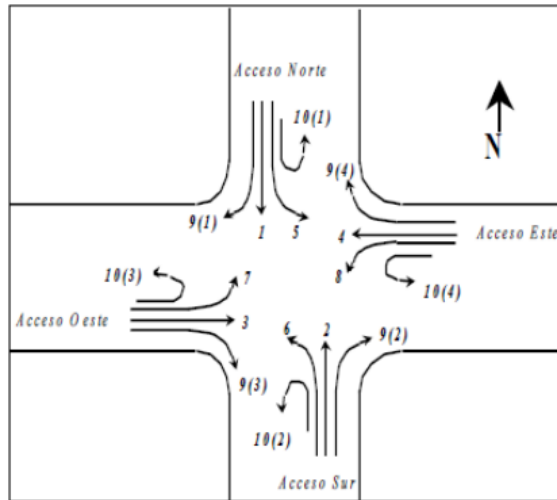


Ilustración 8. Maniobras posibles en una intersección. Fuente: (ANI, 2016)

Actualmente, se pueden hacer los aforos de varias formas, entre las cuales las más importantes y asequibles son enunciados a continuación:

- **Aforo Manual:** Existen dos tipos de metodologías para hacer el aforo manual. La primera es la forma tradicional, que consta en tener al menos a una persona en el sitio de estudio anotando los movimientos por dirección y los distintos tipos de vehículo en una hoja de campo. En la Tabla 2 se observa un ejemplo de una hoja de campo real utilizada para el conteo de aforo en la vía San Carlos - Granada (2009). El personal requerido se estima como una persona por carril, sin embargo, varía dependiendo de la complejidad de la vía. Otra forma de hacer estos aforos es mediante el uso de una o varias cámaras y luego utilizando la grabación para clasificar los vehículos. Independientemente, el resultado es el mismo, un registro de la cantidad de vehículos que pasan por un punto, clasificándolos por tipo, anotando la dirección del flujo y las maniobras.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 2. Ejemplo de Formato de Conteo Vehicular. Fuente: (Gobernación de Antioquia, 2009)

CONSORCIO VIAS DE ANTIOQUIA 2008																							
FORMATO DE CONTEO VEHICULAR																							
CIUDAD Y FECHA:		Granada, Miércoles 28 - Octubre - 2009										VÍA:		Granada - San Carlos									
UBICACIÓN ESTACIÓN:		Salida Granada - San Carlos										AFORADOR:		Julian Urrego A. y María Bernarida Rico									
HORA	PEATONES	CICLISTA		MOTOS		ARREO DE GANADO		VEHICULO LIGEROS		BUSES				VEHICULOS PESADOS				TRACTO CAMION					
		G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G		
Origen-destino		G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G	G-S	S-G
5 - 6 AM	13	2	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6 - 7 AM	19	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1					
7 - 8 AM	9	0	1	1	1	1	0	3	1	0	0	0	1	1	0	0	1						
8 - 9 AM	9	1	0	4	3	1	0	3	1	0	0	1	0	0	0	1	1						
9 - 10 AM	4	0	0	5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
10 - 11 AM	4	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0						
11 - 12 AM	9	0	0	1	0	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	0	0						
12 M - 1 PM	7	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0						
1 - 2 PM	9	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0						
2 - 3 PM	13	0	0	4	5	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0						
3 - 4 PM	28	4	0	3	3	0	2	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0						
4 - 5 PM	14	0	0	1	3	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	1	1						
5 - 6 PM	4	3	6	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	1	0						
6 - 7 PM	7	4	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2					
7 - 8 PM	3	0	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1						
8 - 9 PM	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0						
SUBTOTAL		19	11	30	18	3	2	14	13	0	0	4	4	1	1	7	8						
TOTAL	154	30		48		5		27		0				8				2		15			

* G - S = Granada - San Carlos
* S - G = San Carlos - Granada

Firma: _____

Además, los aforos manuales se pueden dividir dependiendo del período de tiempo del conteo en dos categorías principales, los aforos permanentes y los aforos de base semanal. Los aforos permanentes son aquellos que se hacen durante todo el año, y en Colombia estos se encuentran principalmente en los peajes, donde se debe registrar los vehículos dependiendo de su categoría. Por otro lado, los aforos de base semanal, solo se hacen en algunos días del año (generalmente durante una semana) y a partir de estos datos, se estima para el resto del año. En este caso, a menos de que se requiera en el estudio, se busca que el período de conteo no sea llevado a

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

cabo en eventos especiales. Los eventos especiales incluyen todos los días que alteren el conteo, desde días festivos hasta tormentas (Villegas, 2013).

En general, las ventajas de este método de aforos es que se puede clasificar el tipo de vehículo, haciendo un conteo del número de ejes de los camiones. Además, no necesita ser instalado ningún tipo de hardware ni software, y no es necesario hacerles mantenimiento a estos sistemas. Sin embargo, las desventajas es que en el caso de que sea un aforo base semanal, los datos no son estadísticamente significativos ya que se toman por mucho menos de 30 días en la mayoría de los casos. Por otro lado, los costos son muy altos para mantener un aforo permanente en un lugar distinto a los peajes.

- Aforo automático sin separación de ejes: El aforo automático sin separación de ejes está compuesto por sistemas que detectan el paso de los vehículos, de tipo mecánico o electrónico, pueden medir su volumen y flujo, pero no tienen la capacidad de diferenciar entre tipo de vehículos según su número de ejes, estos son importantes a la hora de tener cantidades y tiempos, para tomar decisiones sobre la capacidad de la infraestructura.

Según Karla Natalia Villegas (2013), en México el más utilizado es el contador neumático, que son los conformados por unas mangueras flexibles y unidas a una caja metálica que recopila los datos. Generalmente se colocan 2 juegos de mangueras en cada sentido debidamente anclados a la calzada.

Es preciso dejar una distancia prudente necesaria entre los sensores para garantizar que los vehículos transiten a la velocidad requerida.

Tiene como ventajas bajo costo y extenso tiempo de cobertura, pero tiene como desventajas que no se pueden registrar movimientos de vuelta, no hay

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

forma de saber si la unidad estuvo inoperativa entre registros y presenta posibles errores con vehículos de más de 3 ejes.

- Aforo automático con separación de ejes: Entre los sistemas más utilizados para el conteo eléctrico se encuentran los sensores piezoeléctricos y los lazos inductivos. Los sensores piezoeléctricos se colocan en pares en la vía y miden la velocidad del vehículo. Los lazos inductivos detectan las variaciones de magnéticas al pasar el vehículo sobre el lazo, a partir de esto, se puede aproximar el tipo de vehículo dependiendo de la variación (Kineo Ingeniería, s.f).
- Cámaras de Televisión: Es una de las alternativas a los aforos manuales más utilizada actualmente. Actualmente, los productores garantizan exactitudes mínimas del 95% proporcionando los movimientos de giro, en glorietas e intersecciones con clasificaciones vehiculares, e inclusive velocidad del vehículo (Tecnoligente, s/f). Sin embargo, hoy en día no es necesario tener una cámara enfocada en el aforo vehicular, basta con tener una grabación y por medio de algoritmos especializados como el que ofrece Camlytics (2018) se obtiene el aforo deseado.

El método de aforo implementado en el presente estudio fue el aforo manual mediante el uso de personal ubicado estratégicamente. Se eligió este modo de aforo debido a que los otros tipos de aforo requieren de infraestructura existente en la vía de estudio, lo cual faltaba en la vía en el área del estudio definido por el alcance. Con respecto al tipo de aforo manual seleccionado se optó por usar exclusivamente personal y no cámaras para el posterior conteo usando la grabación porque utilizando este tipo, se era susceptible al extravío o hurto de aquellas cámaras de propiedad personal.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

2.3.2.2. Simulaciones de tráfico:

Para entender las simulaciones de tráfico, es necesario primero definir que es un modelo y que es una simulación. Según Utadeo (s.f) se entiende como modelo a una representación simplificada de un sistema en algún punto particular del espacio o el tiempo. Una simulación, es la manipulación de un modelo, comprimiendo el espacio y/o el tiempo para tener una distinta perspectiva del sistema. Las ventajas de utilizar una simulación, es que permiten experimentar y sacar conclusiones con un impacto y costo mucho menor a si se hace en la realidad. Existen varias formas de clasificar los modelos, los cuales se muestran a continuación.

- Continuos o discretos: En un modelo discreto, las variables ocurren solo en puntos específicos en el tiempo. Mientras que en un modelo continuo las variables cambian con el transcurso del tiempo sin tener cambios abruptos (Carvalho & Luna, 2002). El flujo vehicular es una variable discreta, pero en algunos modelos es utilizada como continua.
- Determinístico vs Estocástico: Un modelo determinístico, representa un comportamiento que es completamente predecible y perfectamente entendido, en otras palabras, no depende de la incertidumbre. En un modelo estocástico, el comportamiento del sistema no se puede entender por completo por lo que se recurre a elementos como la probabilidad y la estadística (Carvalho & Luna, 2002). Para el caso de una simulación de tráfico, un sistema determinístico no tiene en cuenta la variación de las características de los conductores, que puede incluir entre otras cosas, la longitud de los vehículos y la forma en que manejan los conductores (Alcalá Ramos, 2016).
- Macroscópicos, mesoscópicos o microscópicos: Esta clasificación se utiliza en tránsito para describir el nivel de detalle. En un modelo microscópico se analiza la interacción de cada vehículo o cada peatón. La ventaja de este tipo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

de simulación es que se obtienen resultados con mayor exactitud. Un modelo mesoscópico considera grupos de vehículos como una unidad. Un modelo macroscópico representa el flujo de forma genérica, teniendo en cuenta la relación entre la velocidad, el flujo, y la densidad (Saidallah, El Fergougui, & Elalaoui, 2016).

En este trabajo se realizó una micro simulación continua, estocástica y estática. Esto es debido al software utilizado.

2.3.2.3. Fundamentos de la micro simulación:

2.3.2.3.1. Interacción de los vehículos:

Una de las variables que permiten modificar los softwares de micro simulación es el comportamiento de los conductores. Los conductores pueden tener distintos perfiles de aceleración, desaceleración, distancia segura y cambio de carril (PTV Group, s.f). La explicación de las variables que se cambiaron en este trabajo se encuentran en el título *4.2.5 Comportamiento de los conductores*.

2.3.2.3.2. Tiempo de precarga:

Es importante tener presente que en los modelos de tráfico se tiene un tiempo de precarga o de estabilización, después del cual se pueden empezar a sacar conclusiones. Según FHWA (2004), el tiempo de estabilización debe ser mayor a 20 minutos de simulación, para así evitar la evaluación de un sistema incompleto, en donde las dinámicas entre los vehículos difieren de las típicas.

2.3.2.3.3. Verificación, calibración y validación del modelo:

Al momento de verificar, calibrar y validar un modelo, se busca que efectivamente las condiciones modeladas representen la realidad observada en campo. Para esto, lo primero que se define es la variable que se piensa verificar. En un estudio realizado por Moisés Agustín Alcalá (2016) decidieron verificar el tiempo de viaje,

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ya que consideraron que era la variable más confiable. Luego, en caso de que el modelo no represente la realidad como se pensaba, se deben modificar parámetros hasta que el modelo se pueda validar. Uno de los parámetros que se puede modificar es la interacción de los vehículos.

Según la Federal Highway Administration (s/f) se pueden hacer muchas calibraciones en los modelos de tránsito, entre ellas las más famosas son GEH, los flujos horarios versus los observados, y los tiempos de viaje versus los observados. Para el caso del GEH, se considera que la simulación es estadísticamente representativa cuando es menor a 5 en más del 85% de los casos (FHA, s/f). Este indicador se calcula con la siguiente fórmula: $GEH = \sqrt{\frac{(E-V)^2}{(E+V)/2}}$ de donde E es el valor estimado por el modelo y V es el valor observado en campo. El GEH se utilizó para calibrar los volúmenes vehiculares en el trabajo de Pablo Emilio Muñoz (2014).

2.3.2.4. Costo de una congestión:

Para entender el impacto de las congestiones en la economía, INRIX (2017) divide los costos en directos e indirectos. Los directos consisten entre otras cosas en el costo de oportunidad que pierden los usuarios por estar en la congestión entendido como el costo de invertir el tiempo dependiendo del motivo de viaje. En un estudio realizado por INRIX (2017), calcularon el tiempo que pasa el conductor promedio en congestiones y combinaron esta información con salarios promedios y el tipo de viaje que pueden ser: para ir al trabajo, como parte de su negocio y viajes que no son de trabajo. Esto se hace, ya que se cree que existen distintos costos asociados al tiempo dependiendo del tipo de viaje y también se tiene distinta ocupación de los vehículos (Cookson & Pishue, 2017). Otro factor que tuvieron en cuenta es un *Planning Time Index* que incluye el buffer requerido para llegar a tiempo a tu destino un 95 por ciento de las veces. En otras palabras, es el tiempo de anticipación con el que salen los individuos para ajustar por los imprevistos que se puedan encontrar

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

en la vía. Adicionalmente, en el costo directo se tienen los costos de la gasolina y el impacto social de estas emisiones por vehículo. En el estudio, dividieron el cálculo, dependiendo si los vehículos utilizaban Diesel o gasolina convencional. Los costos indirectos se ven reflejados en el aumento del precio de los productos y servicios debido a la congestión que enfrentan las empresas transportadoras. En el estudio los calcularon, separando entre vehículos comerciales livianos y vehículos comerciales pesados. De todas formas, la manera en la que se calcularon los costos de la congestión es explicada en más detalle en 3. *METODOLOGÍA* y 4.3.1. *Cálculo de exceso de costos*.

3. METODOLOGÍA

1. Estimar el volumen vehicular en la doble calzada las Palmas entre el km 5 y el km 15 en las horas de máxima demanda, haciendo uso de información primaria por aforos vehiculares, generando así insumos para iniciar la modelación.

El primer insumo del trabajo es la recolección de los datos de tránsito. Cabe aclarar que este estudio se enfoca en el horario más crítico de la Avenida las Palmas entre el km 5 y el km 15, por esto, no se necesita un aforo detallado de todos los días y todas las horas. Para encontrar este horario crítico, se agruparon los días de la semana en dos: los días en semana y los días en fin de semana. Para la determinación de las horas más críticas se utilizó la herramienta de Google Maps la cual estima cual la duración de los viajes dependiendo de la hora en la que se realice el viaje. Esto se logra gracias a que todos los dispositivos móviles que tengan los servicios de ubicación activados envían información anónima a Google, permitiendo analizar el número total de vehículos y su velocidad en una vía en cualquier momento (Stenovéc, 2015). Por medio de la recolección masiva de datos, Google ha adquirido un historial de cómo es el tráfico usualmente en vías específicas a distintos horarios.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Adicionalmente se definieron los puntos en los que se debe aforar. Para esto, se consideraron los puntos principales de ingreso y salida a la vía, con sus respectivos retornos principales. El criterio para considerar un retorno como principal es su cercanía a una entrada o salida de la vía las Palmas y el espaciamiento entre retornos. En la Tabla 3 se observan cuales fueron estos puntos, y se dividen en tres categorías: ascendente, descendente y retornos.

Tabla 3. Definición de puntos de aforo. Fuente: Elaboración Propia.

Punto	Descripción
ASCENDENTE	
1.1	Entran por Cola del Zorro
1.2	Salen por Cola del zorro
1.3	Palmas Ascendente antes de la Cola del Zorro
1.4	Entran por Balsos
1.5	Salen por Balsos
DESCENDENTE	
2.1	Palmas Descendente en Baltimore
2.2	Palmas Descendente en Entre Maderos
2.3	Salen por Balsos
RETORNOS	
3.1	Baltimore
3.2	Latino
3.3	Musical
3.4	CAI
3.5	Candelaria

Luego de tener las horas y los lugares de aforo bien definidos, se procedió a realizar aforos vehiculares, categorizando los vehículos que transitan por esta vía. Las categorías en las que se dividió este estudio fueron: bicicleta, motocicleta, carros, bus y camión. Los buses con capacidad menor a 20 personas y las vans pertenecen a la categoría de carros por su comportamiento similar.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Posterior a realizar los aforos, se organizó la información para poder obtener la hora de máxima de máxima demanda. Esta hora se definió en semana y fin de semana tanto para el carril ascendente como para el descendente. Utilizando estos valores de hora de máxima demanda, se procedió a mover los aforos por medio de conceptos de continuidad de flujo para poder tener exactamente los puntos que serán utilizados para ingresar los vehículos en la simulación. Es importante tener en cuenta que el volumen de entrada vehicular fue variable en el tiempo. Esto se explica a fondo en el título *4.2.8. Entradas vehiculares*.

2. Simular bloqueos sobre un modelo de microsimulación de tráfico para medir los tiempos y colas en congestión.

Para comenzar el proceso de modelado, además de tener los datos de los aforos, fue necesario obtener las secciones viales. Además, se investigó la pendiente de la vía, la cual se obtuvo con la información altimétrica presentada por Google Maps. Posteriormente, se pasó a modelar la vía en PTV Vissim. Con la vía diseñada en PTV Vissim, se procedió a definir parámetros para el comportamiento de los conductores, que se hizo a juicio de lo observado en la vía. Posteriormente, se insertaron los datos de los aforos de tránsito. Después se realizaron las primeras corridas de la simulación, para así poder calibrar la simulación. Como los volúmenes de tránsito son constantes en el tiempo la metodología que se utilizó para calibrar el modelo es GEH. Para esta simulación se tomó como referencia el criterio de calibración de modelos de Wisconsin (FHA, s/f-b), el cual dice que GEH debe ser menor a 5 en más del 85% de los casos, y que en ningún momento el GEH sea mayor a 10. Las variables calibradas fueron los tiempos de demora de los vehículos y los volúmenes de tránsito, basándose en estudios realizados por Moisés Agustín Alcalá (2016) y Pablo Emilio Muñoz (2014).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Más adelante, se simularon distintas condiciones de bloqueo, cambiando si la afectación se da en uno o dos carriles. Adicionalmente, se simularon los incidentes en cinco lugares distintos (dos en el sentido descendente y tres en sentido ascendente). Esto con el fin de evaluar las distintas dinámicas caracterizadas por entradas y salidas principales. También, se consideró que las condiciones que evalúan más cantidad de malla vial simulada, es si se ubican los bloqueos lo más lejos posible de estas entradas y salidas. Para observar más a fondo los lugares en que se situaron los incidentes, se recomienda observar el título *4.2.10. Incidentes*. Finalmente, los resultados de las longitudes de colas se encuentran en el *ANEXO D. Resultados de red* aunque se calcularon no se utilizaron el desarrollo del estudio porque las ecuaciones propuestas dependían de otras variables tales como: velocidades promedias, tiempos totales de movilización, número total de vehículos, y finalmente distancia total recorrida.

3. Determinar y evaluar los costos por una congestión en el trayecto de estudio a partir de los resultados del modelo, considerando el costo de oportunidad, el costo del combustible desperdiciado, los costos sociales de las emisiones y el desgaste del vehículo para distintos tipos de bloqueo en distintas partes de la vía.

Con las simulaciones realizadas, se encontraron los flujos de vehículos, los tiempos y demoras en congestión promedio, el tamaño de las colas, el nivel de servicio de la vía y las emisiones producidas dependiendo del tipo de bloqueo y lugar del bloqueo. Para poder encontrar estos datos, se compara un escenario base, con un escenario en el que se produzca el incidente. El tiempo de normalización del flujo se contó desde que sucede el incidente, hasta el tiempo de recuperación del flujo. Para complementar esta información, se estimó el costo de oportunidad de las personas que transitan esta vía, costo del combustible desperdiciado, costos sociales de las emisiones y el desgaste del vehículo. Para encontrar los costos de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

oportunidad, se basó en la metodología utilizada en la tesis “Metodología para evaluar los sobrecostos por congestión vehicular en la malla vial arterial principal de la ciudad de Bogotá D.C.” (Muñoz Puentes, 2014) que esta a su vez se basa en la metodología usada en “Costos de la congestión en una vía urbana: aplicación a un tramo de la calle 30 en Medellín” (Sarmiento, González, Lozano, & Salazar, 2003), fundamentadas por el trabajo de Rebusié, Monzón y Sarmiento (1999). Utilizando estas últimas dos referencias se determinaron los demás costos como los operacionales (desgaste del vehículo) que comprenden los costos de excesos de combustible, lubricante y mantenimiento, y finalmente los costos por el exceso de contaminación.

Para los **costos sociales por el costo de oportunidad** se plantea la siguiente Ecuación 1

$$C_D = L_{ij} T_c \sum_{k=1}^k \alpha_k Q_{ijk} n_k \left(\frac{1}{V_{ijk}} - \frac{1}{V_{rijk}} \right)$$

Ecuación 1

Donde:

C_d : Costo de demora del tramo ij para un periodo de congestión

L_j : Longitud del tramo ij

T_c : Duración del periodo de congestión

α_k : Es el valor del tiempo de los usuarios de los vehículos k

Q_{ijk} : El número promedio de vehículos tipo k por hora que pasa por el tramo ij durante el periodo T_c

n_k = Factor de ocupación media de los vehículos tipo k

V_{ij} = Velocidad de congestión de vehículos tipo k del tramo ij

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

V_{rij} = Velocidad de referencia de vehículos tipo k del tramo ij.

Sin embargo, los autores decidieron adoptar unas ecuaciones empíricas deducidas de la Ecuación 1. Estas son: a Ecuación 2, que corresponde al costo social de la movilización, mientras que la Ecuación 3 solamente al costo social de la congestión:

$$CSM_i = \sum_{k=1}^3 tv_{ik} V_{ik} OC_k VST_k$$

Ecuación 2

$$CSC_i = \sum_{k=1}^3 d_{ik} V_{ik} OC_k VST_k$$

Ecuación 3

Donde:

I: Situación modelada. 1: Situación ideal, 2: Situación real.

K: Tipo de vehículo. 1: Particular, 2: Bus, 3: Camión

CSM_i: Costo social de movilización en la red vial para la situación modelada i (\$).

CSC_i: Costo social de la congestión en la red vial para la situación modelada i (\$).

$tv_{ik} = 60 * TV_{ik} / V_{ik}$: Tiempo de viaje promedio para el tipo de vehículo k en la situación modelada i (min).

V_{ik} : Cantidad de vehículos del tipo k en la situación modelada i (veh).

OC_k : Tasa de ocupación promedio para el tipo de vehículo k (pas/veh).

VST_k : Valor subjetivo del tiempo para el tipo de vehículo k (\$/min).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

TV_{ik} : Tiempo de viaje total para el tipo de vehículo k en la situación modelada i (hr).

Tm_{ik} : Tiempo total de viaje en movimiento para el tipo de vehículo k en la situación modelada i (hr).

dem_{ik} : Demora para el tipo de vehículo k en la situación modelada i (hr).

$d_{ik} = 60 * dem_{ik} / V_{ik}$: Demora promedio para el tipo de vehículo k en la situación modelada i (hr).

No fue posible conseguir una copia de los estudios de Rebuté et al., (1999) y Sarmiento et al. (2003), así que solo se contó con la información citada por Muñoz Puentes (2014). La Ecuación 2 fue de mayor interés ya que calcula el costo total de la movilización para posteriormente ser contrastada con el escenario ideal y encontrar los excesos de costos de movilización, mientras que con la Ecuación 3 solo se encuentran los excesos de costos de congestión, que es nada más una porción de los excesos de costos de movilización.

Para el cálculo de **costos de operación** se plantea las siguientes ecuaciones:

El costo del combustible para un tramo ij durante un periodo se puede calcular con la Ecuación 4.

$$C_g = P_g T_c Q_{ij} C_{60} \left(0.8 + \frac{12.66}{V_{ijk}} \right) L_{ij}$$

Ecuación 4

Donde:

C_g = costo de combustible para una velocidad de congestión en el tramo ij

P_g = precio del combustible sin los impuestos

T_c = Tiempo duración de la congestión.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Q_{ijk} = número promedio de vehículos tipo k por hora

C_{60} = consumo del vehículo a una velocidad de 60 Km /hora. En España, según SARMIENTO & ROBUSTÉ (1999) se usaba 8,2 lt por cada 100 Km de recorrido para vehículos livianos y para vehículos pesados 13,0 lt por cada 100 Km

V_{ijk} = velocidad de congestión en el tramo ij

L_{ij} = longitud del tramo en estudio

El término $(0,8 + 12,66/ V_{ijk})$ es un factor de conversión aplicado para distintas velocidades en el estudio de SARMIENTO & ROBUSTÉ (1999) (Muñoz Puentes, 2014).

El costo del lubricante para un tramo ij durante un periodo se puede calcular con la Ecuación 5.

$$C_i = P_i 0.014 T_c Q_{ij} C_{60} \left(0.8 + \frac{12.66}{V_{ijk}} \right) L_{ij}$$

Ecuación 5

Donde:

C_i = Costo de lubricante para una velocidad de congestión en el tramo ij

P_i = Precio del lubricante sin los impuestos.

El costo del lubricante para un tramo ij durante un periodo se puede calcular con la Ecuación 6.

$$C_m = 360 V_{ijk}^{-0.44} L_{ij} T_c Q_{ij}$$

Ecuación 6

“El valor de \$360 surge de convertir una constante de 24 pesetas en pesos” (Muñoz Puentes, 2014). Al sumar los costos del combustible, lubricante y de mantenimiento

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

se obtienen los costos de operación. Para la posterior determinación de excesos de costos en este estudio, se ajustó el valor de \$360 en el 2009 al valor real de pesos colombianos del 2019 por medio de inflación.

Finalmente, para el cálculo de **costos de contaminación** se plantea la siguiente ecuación:

El costo de la contaminación para un tramo ij y un tipo de vehículo está definido por la Ecuación 7:

$$C_{ck} = \frac{C_a}{T_a} (2.006 - 0.017V_{ijk}) L_{ij} Q_{ijk} T_c F_k$$

Ecuación 7

C_{ck} = Costo de la contaminación para un tramo ij en un período de congestión para un tipo de vehículo k

C_a = Costo de la contaminación debido al tránsito anual de una ciudad

T_a = Es el tránsito total anual de una ciudad en veh - Km

V_{ijk} = Velocidad media de circulación en Km/h para el vehículo tipo k

F_k = Factor de contaminación según el tipo de vehículo. Para livianos es 1 y para pesados en 3,76 (en el caso del Monóxido de Carbono).

“El término (C_a / T_a) es igual a \$28/veh-km, que surge de convertir una constante de 1,87 pesetas/veh-km en pesos colombianos. Se requieren estudios en Colombia para determinar ese valor, y por eso se empleará esa aproximación utilizada en SARMIENTO & ROBUSTÉ (1999) para vehículos livianos en España” (Muñoz Puentes, 2014) .

Estas últimas ecuaciones descritas están en función de las velocidades promedios de flujo de un escenario ideal sin congestión y un escenario real donde se presenta

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

la congestión. El costo de oportunidad de los usuarios se calculó utilizando el valor del tiempo por usuario, la ocupación media por vehículo y las horas en congestión por vehículo. En el valor medio por usuario se categorizaron los usuarios con el fin de tener un estimativo que se acople más a la realidad. Los costos operativos se calcularon como el costo adicional en consumo de combustible, lubricante y por mantenimiento en general, atribuyendo el mayor consumo de combustible a velocidades inferiores, y el desgaste adicional del vehículo por la constante aceleración y desaceleración. Es importante anotar que las variables tomadas de la simulación para la aplicación de estas fórmulas fueron, para todos los escenarios: velocidades promedias, tiempos totales de movilización, número total de vehículos, y finalmente distancia total recorrida.

Por último, los costos de las emisiones se calcularon mediante a costos estimados internacionalmente por cada km recorrido por un vehículo. Para todos estos costos se definió si el impacto de las pérdidas son costos individuales o si son sociales.

4. Proponer estrategias para la reducción del tiempo total del incidente en el área de estudio a partir de la relación costo – duración de la congestión.

A partir de los datos encontrados, se procedió a hacer un análisis de estos, definiendo zonas y escenarios críticos. Dependiendo de su potencial de ahorro, y el comportamiento del incidente. Como referencia para los potenciales ahorros, se utilizaron los salarios de los agentes de tránsito. Adicionalmente, se evaluó cual punto de los distintos lugares simulados es más crítico en el caso de un incidente. Esto es algo que podría ser útil para una entidad de tránsito ya que podrían tomar decisiones acerca de cómo coordinar y posicionar su personal.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Recolección de datos

4.1.1. Determinación de las horas pico

La estimación de flujos vehiculares y de tiempos de recorrido en la vía Las Palmas se realizó únicamente en las horas pico, estas horas específicas representan las condiciones críticas en la vía donde se incrementan las probabilidades de incidentes (Chang & Xiang, 2003). Para poder encontrar estas horas pico es importante analizar el flujo discriminado por días y horas en Las Palmas, pero esta información se desconoce y para poder obtenerla de una forma confiable se debe recurrir a datos históricos, los cuales para este caso solamente se pueden obtener mediante una solicitud formal al SIR, proceso que puede tardar meses e inclusive puede ser negado. Por esta razón, se utilizó la aplicación de movilidad, Google Maps.

Usando entonces la herramienta de Google Maps, es posible averiguar los rangos de tiempo que usualmente se tarda un vehículo en recorrer Las Palmas entre el km 5 y el km 15 en distintos días a distintas horas como se muestra en la Ilustración 9 y la Ilustración 10.

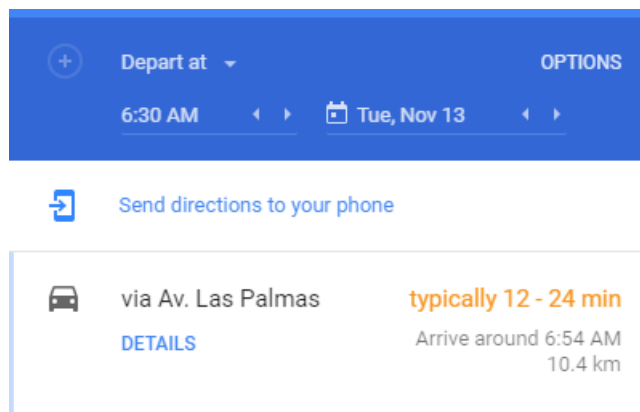


Ilustración 9. Ejemplo tiempo de recorrido Google Maps. Fuente: (Google, 2018)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 10. Ejemplo Ruta Google Maps Fuente: (Google, 2018)

Se recolectó entonces los tiempos de recorrido de todos los días de la semana entre las 5 AM y las 11 PM. Los resultados correspondientes a este análisis se pueden observar en la Ilustración 11 e Ilustración 12.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

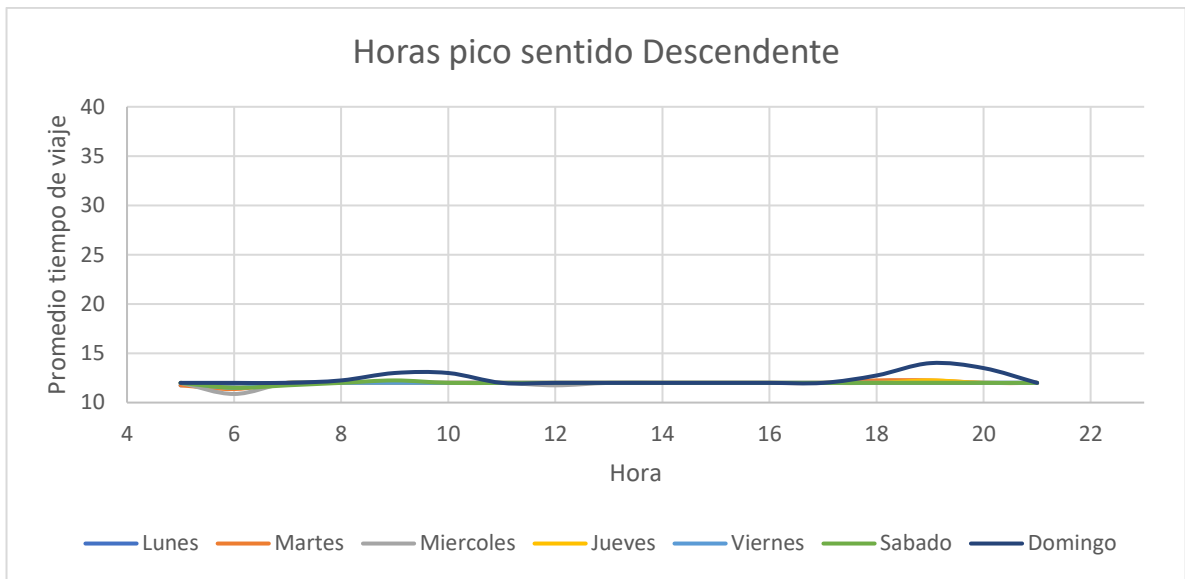


Ilustración 11. Horas pico sentido descendente Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps (Google, 2018).

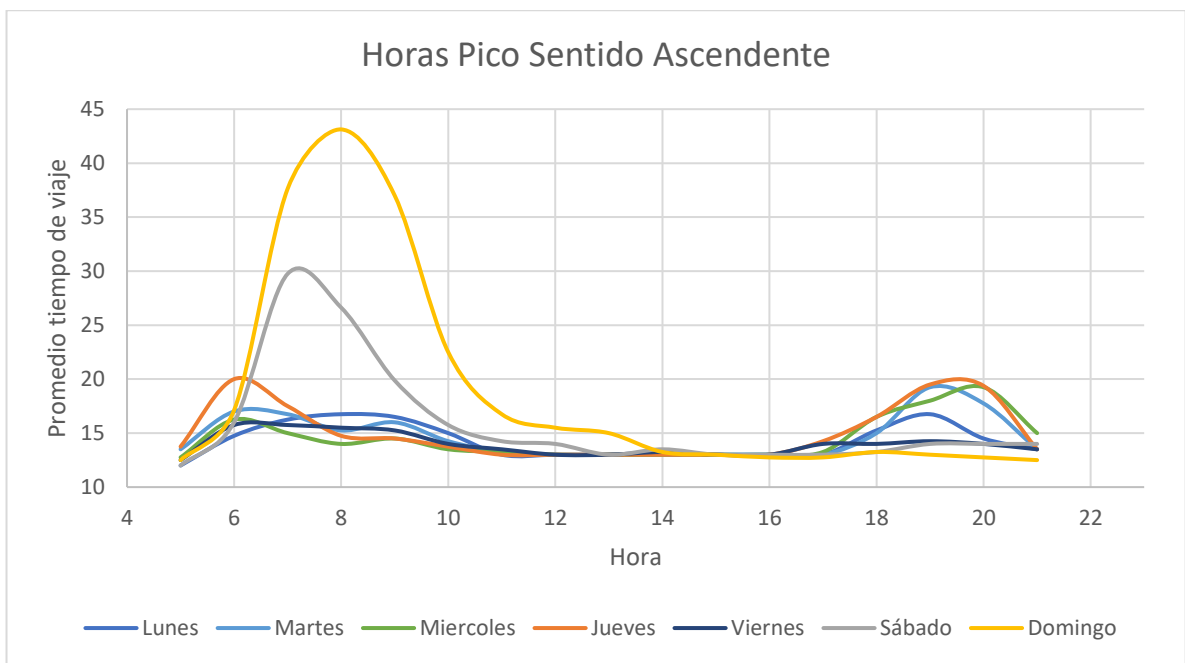


Ilustración 12. Horas pico sentido ascendente Fuente: Elaboración propia a partir Google Maps (Google, 2018).

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Como se puede observar en las figuras anteriores, las horas pico se ubican en la mañana y en la tarde, y se asimilan a las horas de pico y placa establecidas por el municipio de Medellín (7:00 AM – 8:30 AM y 5:30 PM a 7:00 PM), con unas cuantas diferencias. Analizando detenidamente se determinó la distribución de horas pico observada en la Tabla 4.

Tabla 4. Horas pico evaluadas Fuente: Elaboración propia.

Sentido	Horas Pico			
	Semanal		Fin de Semana	
Ascendente	Martes, miércoles y jueves		Domingo	
	5:45 am - 7:45 am	6:30 pm - 8:30 pm	7:00 am - 9:00 am	6:00 pm - 8:00 pm
	Semanal		Fin de Semana	
Descendente	Indiferente	Martes y jueves	Domingo	Domingo
	6:30 am - 8:30 am	5:45 pm - 7:45 pm	7:00 am - 9:00 am	6:00 pm - 8:00 pm
	Semanal		Fin de Semana	

Cabe notar que, la gráfica de sentido ascendente muestra que el día con mayor flujo es el domingo en la mañana, esto es porque los domingos se presenta una anomalía en el tráfico desde el 2017 que implementaron la ciclovía en Las Palmas. La ciclovía en Las Palmas consiste en la habilitación del carril izquierdo para las bicicletas, entre las 6:00 am y 10:00 am para facilitar la práctica deportiva de forma segura sin afectar la movilidad.

4.1.2. Aforos de tránsito

Una vez identificadas las horas pico, se determinaron los puntos de aforo para poder tomar la información del flujo ascendente, descendente y de los retornos entre el tramo del alcance del proyecto, los resultados de los puntos que se aforaron se pueden ver en la Tabla 5.

Tabla 5. Puntos aforados. Fuente: Elaboración Propia.

Punto	Descripción	Día Semana	Día Fin de Semana
-------	-------------	------------	-------------------

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Hora		AM	PM	AM	PM
ASCENDENTE		X	X	X	X
1.1	Entran por Cola del Zorro	X	X	X	X
1.2	Salen por Cola del zorro	X	X	X	X
1.3	Palmas Ascendente antes de la Cola del Zorro	X	X	X	X
1.4	Entran por Balsos	X	X	X	X
1.5	Salen por Balsos	X	X	X	X
DESCENDENTE		X	X	X	X
2.1	Palmas Descendente en Baltimore			X	X
2.2	Palmas Descendente en Entre Maderos	X	X		
2.3	Salen por Balsos	X	X	X	X
RETORNOS		X	X	X	X
3.1	Baltimore	X	X	X	X
3.2	Latino	X	X	X	X
3.3	Musical	X	X	X	X
3.4	CAI	X	X	X	X
3.5	Candelaria	X	X	X	X

La localización exacta de estos puntos se puede observar en la Ilustración 13. En la consideración de los retornos a aforar se despreciaron los retornos de Doña Rosa y el retorno del mirador por su cercanía al retorno del CAI y retorno Musical, respectivamente. El retorno del CAI es el retorno más cercano que permite al flujo ascendente proveniente de Balsos coger el sentido descendente y por esto se considera que tiene mayor flujo vehicular que el retorno de Doña Rosa. Similarmente, el retorno de Musical cumple la misma función con el flujo ascendente proveniente de la Cola del Zorro.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 13. Georreferenciación de los puntos aforados Fuente: Elaboración propia a partir de Google Maps (Google, 2018).

Para poder tomar los datos en campo es necesario contar con una plantilla de toma de datos que incluya todas las categorías de tráfico, en las filas se tienen los tiempos de aforo separados cada 15 minutos para la facilidad del personal. Se desarrollaron las siguientes plantillas, observadas en la Tabla 6 y Tabla 7. La plantilla 1 se diseñó para el aforo de un solo sentido mientras que la plantilla 2 se diseñó con una separación por categoría para que una persona pueda aforar un retorno. La columna izquierda corresponde al retorno usado por los vehículos que van en sentido

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

descendente y cambian al sentido ascendente, mientras que la columna derecha corresponde al retorno usado por los vehículos que cambian al sentido descendente. Las primeras filas son utilizadas para especificar datos del aforo como fecha de elaboración, si fue en la tarde o en la mañana, y el punto en donde se elaboró.

Tabla 6. Ejemplo plantilla de aforo sencillo. Fuente: Elaboración propia.

Fecha		Hora			Punto	
21-oct		AM			1.4	
Hora	Bici	Motos	Carros, vans y busetas	Bus	Camiones	
7:00-7:15	0	12	85	0	0	
7:15-7:30	0	5	77	0	0	
7:30-7:45	0	21	99	0	1	
7:45-8:00	0	24	98	0	1	
8:00-8:15	4	19	122	0	2	
8:15-8:30	0	20	91	0	0	
8:30-8:45	0	16	120	0	4	
8:45-9:00	0	16	111	0	0	

Tabla 7. Ejemplo aforo doble. Fuente: Elaboración propia.

Fecha		Hora		IZQ	DER	Punto				
31-oct		AM		DESC->ASC	ASC->DESC	3.4				
Hora	Bici	Motos	Carros, vans y busetas	Bus		Camiones				
6:00 - 6:15	0	1	0	0	1	2	0	2	0	0
6:15 - 6:30	0	0	0	0	1	13	0	0	0	0
6.30 - 6:45	0	0	0	1	2	28	0	2	0	0
6:45 - 7:00	0	2	0	4	0	43	0	0	0	0
7:00 - 7:15	0	0	0	2	1	29	0	1	0	1
7:15-7:30	0	1	0	5	1	17	0	1	1	1
7:30-7:45	0	1	0	1	1	17	0	1	0	0

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

7:45-8:00	0	0	0	4	0	36	0	1	0	0
-----------	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---

Finalmente se procedió a la elaboración de los aforos siguiendo todas las especificaciones antedichas. Para poder aforar Las Palmas en el estado de flujo normal, o sea el que está presente la mayor parte del año, fue de vital importancia realizar todos los aforos antes de que las instituciones académicas terminaran sus jornadas. El flujo escolar y universitario hace parte de un flujo importante que tienen un horario de ingreso en el periodo de tiempo analizado. Para esto fue necesaria la ayuda de terceros de confianza, los cuales facilitaron el trabajo a realizar. Los resultados de estos aforos se pueden observar en el *ANEXO A. Aforos y Análisis de los Aforos*.

4.1.2.1. Análisis de los aforos de tránsito

Con los aforos cada 15 minutos definidos, se procedió a agrupar los aforos en valores totales de vehículos en sentido ascendente y descendente. De esta forma, se analizaron dos escenarios de forma independiente, tanto para día de semana como para día de fin de semana. A continuación, en la Tabla 8 y la Tabla 9 se observa los valores encontrados. Los resaltados en amarillos fueron los valores considerados críticos. Analizando los valores de la Tabla 8, se concluye que el mayor flujo se obtiene en la mañana, sin embargo, este mayor flujo es causado por bicicletas, por esto se considera que el horario más crítico es de 6:15- 7:15 pm. Este análisis completo se encuentra en el *ANEXO A. Aforos y Análisis de los Aforos*.

Tabla 8. Resumen de los aforos realizados en fin de semana agrupados por sentido. Fuente: Elaboración propia.

Consolidado Total Fin de Semana												
Rango	Bicis		Motos		Carros, vans y busetas		Buses		Camiones		Total	
Punto	Ascen	Descen	Ascen	Descen	Ascen	Descen	Ascen	Descen	Ascen	Descen	Ascen	Descen

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

AM												
7:00 -												
8:00	374	74	168	89	695	350	14	14	13	12	1264	539
7:15-												
8:15	429	104	185	95	782	383	14	16	13	11	1423	609
7:30-												
8:30	493	141	203	110	812	410	14	17	11	7	1533	685
7:45 -												
8:45	560	183	199	109	872	435	18	17	13	8	1662	752
8:00 -												
9:00	550	251	185	122	894	483	18	19	11	6	1658	881
PM												
6:00-												
7:00	2	3	125	337	978	2192	25	21	3	14	1133	2567
6:15-												
7:15	8	2	116	308	1003	2144	25	28	2	13	1154	2495
6:30-												
7:30	9	2	109	292	997	2168	25	30	3	11	1143	2503
6:45-												
7:45	11	0	112	276	972	2059	19	27	3	6	1117	2368
7:00-												
8:00	11	0	107	259	949	1909	22	33	2	7	1091	2208

Tabla 9. Resumen de los aforos realizados en semana agrupados por sentido. Fuente: Elaboración propia.

Consolidado Total Semana												
Rango	Bicis		Motos		Carros, vans y Busetas		Buses		Camiones		Total	
Punto	Ascen	Descen	Ascen	Descen	Ascen	Descen	Ascen	Descen	Ascen	Descen	Ascen	Descen
AM												
5:30 -												
6:30	65	1	618	84	1491	254	98	16	49	0	2321	355
5:45 -												
6:45	97	9	963	256	2044	982	140	33	58	4	3302	1284
6:00 -												
7:00	101	21	1236	481	2590	1657	149	49	52	17	4128	2225
6:15 -												
7:15	101	31	1311	612	3063	2059	147	68	46	31	4668	2801
6:30 -												
7:30	96	41	1361	793	3370	2478	129	91	47	44	5003	3447

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

6:45 - 7:45	61	44	968	767	2675	2285	82	95	34	45	3820	3236
7:00 - 8:00	35	36	619	670	1741	2127	56	99	28	37	2479	2969
7:15- 8:15	17	29	338	598	889	2101	34	84	17	31	1295	2843
7:30- 8:30	0	24	4	439	46	1992	1	70	0	27	51	2552
PM												
5:45- 6:45	10	5	93	785	472	1679	11	54	8	43	594	2566
6:00- 7:00	17	4	140	743	805	1878	17	40	18	44	997	2709
6:15- 7:15	26	7	178	640	1117	1919	23	35	22	53	1366	2654
6:30- 7:30	39	7	236	515	1445	1885	28	32	25	48	1773	2487
6:45- 7:45	38	6	214	400	1399	1658	22	22	24	45	1697	2131
7:00- 8:00	41	6	204	328	1339	1259	23	19	16	33	1623	1645
7:15- 8:15	39	3	205	208	1286	740	21	9	17	12	1568	972
7:30- 8:30	26	1	154	103	1077	321	18	2	13	4	1288	431

Es importante notar que, aunque se tomó datos de flujos vehiculares los fines de semana, éstos no terminaron siendo utilizados para la simulación por diversas razones. Una de ellas que los excesos de costos de movilización son directamente proporcionales a la cantidad de vehículos que transiten por el tramo. En otras palabras, entre más carros transiten, mayores serán los excesos de costos. Comparando los flujos máximos obtenidos a partir de los aforos se encontró que el flujo vehicular es aproximadamente 3 veces y 1.34 veces mayor en sentido ascendente y descendente respectivamente en semana que en fin de semana. Volviendo así los flujos mayores semanales, el caso más crítico. Además, según Sarmiento et al (2003), los excesos de costos totales anuales para el subtramo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

evaluado en el estudio correspondían a: 68.5% a demora o costos sociales de oportunidad, 22.7% a costos de operación del vehículo que comprende los excesos de combustible, lubricante y mantenimiento, y finalmente un 8,7% a costos de exceso de contaminación. Lo que significa que la mayor parte de los excesos de costos de movilización los contribuye los costos sociales de oportunidad, que es afectado proporcionalmente por el precio del tiempo atribuido a los usuarios. Se puede inferir que la proporción de vehículos con trayectos relacionados con el trabajo es mayor en semana, que el fin de semana, donde la población suele tener sus días de descanso. Según el Estudio de demanda vehicular del Túnel de Aburrá – Oriente (Steer Davies Gleave, 2009), el valor del tiempo para un trayecto con intenciones recreativas tiene un valor de 146 \$/min, comparado con un trayecto con destino el regreso al hogar que tiene un valor de 349,2 \$/min. Por estos motivos se consideró que el caso más crítico y relevante a evaluar es el escenario en semana.

4.1.3. Anchos de vía

Los anchos de las curvas en la avenida las Palmas fueron proporcionados por Jairo Palacio (2019). Para los anchos restantes el criterio utilizado fue evitar cambios abruptos de sección para así prevenir demoras innecesarias en la simulación. Estas medidas fueron corroboradas con la opción de regla que da Google Earth.

4.2. Estructuración del modelo de microsimulación:

El modelo de microsimulación completo se encuentra en *ANEXO C. Simulación*.

4.2.1. Software

Actualmente existen varios simuladores de tráfico. En un estudio realizado para MATEC web of conference (2016), compararon los atributos de 11 de los más relevantes y encontraron en sus conclusiones que para hacer una micro simulación continua, una de las mejores opciones era Vissim por su curva de aprendizaje y sus características. Esto, combinado con la disponibilidad de Vissim en la UEIA, hacen

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

que este sea el simulador de tráfico escogido para el proyecto. Cabe resaltar que MATSim, también es un simulador de tráfico con características similares y que adicionalmente es de código abierto. A continuación en la Tabla 10 y Tabla 11, se muestra la tabla comparativa y su leyenda traducida respectivamente.

Tabla 10. Comparación de Software para Simulaciones de Tráfico. Fuente: (Saidallah et al., 2016)

Simulators	Model			Category			System		Visualization		Infrastructure						Vehicles and pedestrians					Scope Area			Detectors		GIS		
	I	E	A	O	C	D	C	2D	3D	Difficulty			Flexibility			T	D	R	E	O	I	R	O	WD	WL	Y	P	N	
										E	M	D	F	L	VL														
AIMSUN	√	√	√		√		√	√	√				√	√				√	√	√		√	√	√	√	√			
ARCHISIM	√				√	√		√					√			√					√		√						√
CORSIM	√				√	√		√	√							√		√		√	√	√							√
MATSim	√			√			√	√						√						√	√	√			√				
MITSIMLab	√			√				√						√						√		√							√
Paramics	√				√	√		√	√					√				√	√	√	√	√	√	√	√	√			
SimTraffic	√				√			√	√	√				√				√	√	√	√	√	√	√	√	√			√
SUMO	√			√			√	√						√						√	√	√	√	√	√	√			
TRANSIMS	√	√		√		√		√						√						√	√	√	√	√	√	√			
TransModeler	√	√	√		√			√	√					√					√		√	√	√	√	√	√			√
VISSIM	√				√		√	√	√	√				√					√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	

Tabla 11. Leyenda de la Tabla de Comparación de Software para Simulaciones de Tráfico. Fuente: (Saidallah et al., 2016).

Criterio	Abreviación	Significado	
Modelo	I	Microscópico	
	E	Mesoscópico	
	A	Macroscópico	
Categoría	O	Código abierto	
	C	Comercial	
Sistema	D	Discreto	
	C	Continuo	
Visualización	2D	Dos dimensiones	
	3D	Tres dimensiones	
Infraestructura	Dificultad	E	Fácil
		M	Medio
		D	Difícil

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

	Flexibilidad	F L VL	Flexible Limitado Muy limitado
	Vehículos y peatones	T D R E O	Tipo Dimensión Prioridad Peatón Otros vehículos (buses)
	Área de Estudio	I R O	Ciudad Región País
	Detectores	WD WL	Sensor alámbrico Sensor inalámbrico
	GIS	Y P N	Si Parcialmente No

4.2.2. Geometría de la vía

Para diseñar la geometría de la vía en PTV Vissim se tomó como referencia la base satelital que tiene el software, la cual es proporcionada por Bing Maps. Luego de tener el bosquejo de la malla vial, se procedió a suavizar las curvas para evitar que los vehículos presenten demoras innecesarias. Posteriormente, se ingresaron los anchos de las diferentes secciones viales. Cabe resaltar, que en los lugares de ingreso a la simulación se aumentó la geometría de la vía para así evitar la acumulación excesiva de vehículos cuando se presenten los incidentes y la inhabilidad de ingreso de estos vehículos a la simulación. Luego, se incluyó la pendiente de la vía, la cual se sacó con ayuda de la herramienta altimétrica que proporciona Google Maps y midiendo la distancia total de la vía, se realizó una regla de 3 para encontrar la pendiente promedio, la cual se observa en la Tabla 12.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 12. Gradientes utilizados en el modelo. Fuente: Elaboración propia.

	Altura Inicial	Altura Final	Gradiente Bajando	Gradiente Subiendo	Longitud bajando	Longitud Subiendo
Palmas	1775	2453	- 7.1%	7.0%	9483	9627
Balsos	1945	2130	- 17.7%	20.6%	1048	900
Cola del Zorro	1780	1941	- 35.9%	36.0%	448	447

Más adelante, se encontró que las pendientes seleccionadas para los Balsos y la Cola del Zorro ambas en sentido ascendente no se representan apropiadamente en el software, ya que los vehículos se quedan atorados. En Vissim advierten que por cada incremento en la pendiente se disminuye la aceleración de los vehículos. Con base a esto, en lugar de modelar estos dos tramos con sus pendientes indicadas, se adicionaron reductores de velocidad que limitan la velocidad máxima.

4.2.3. Priorización de la vía

Tanto en sentido ascendente como descendente se priorizó la avenida las Palmas, haciendo que los vehículos deban detenerse cada vez que intenten ingresar. En la Ilustración 14 se encuentra un ejemplo de cómo se visualiza la priorización de las vías, donde la línea verde muestra la vía que tiene la prioridad.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

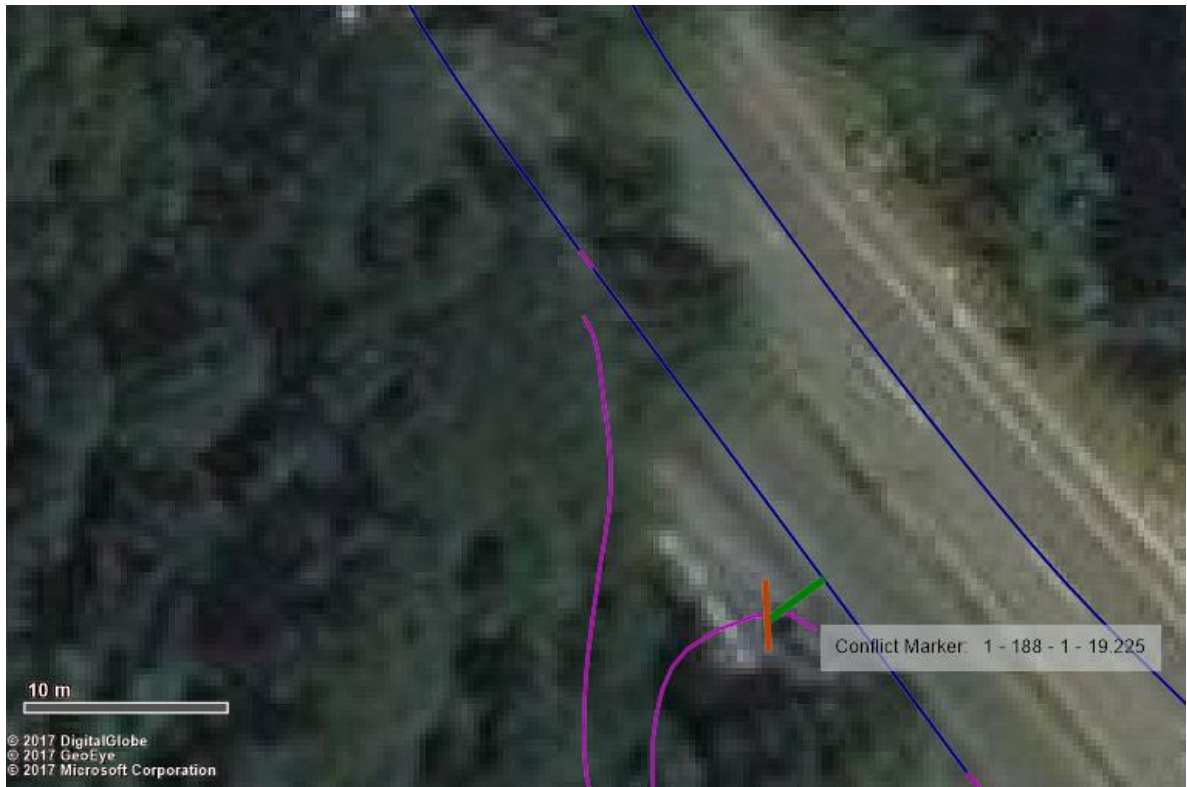


Ilustración 14. Priorización de las vías en PTV Vissim. Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Rutas

Se procedió a definir cada ruta que puede tomar un vehículo. Para esto, se reorganizaron los datos de los aforos de tránsito y se construyeron cuadros que comparan el porcentaje de los vehículos que toma cada ruta en la hora de máxima demanda. Cabe resaltar que estas proporciones se realizaron por tipo de vehículo, lo que dio origen a que se tenga un total de 65 rutas. En la Tabla 13 se observan los resultados para el caso en que los vehículos vayan ascendiendo por la vía las Palmas y deban decidir si tomar o no el Retorno de Baltimore, todos estos valores se basaron en los aforos realizados.

Tabla 13. Ejemplo numérico de la decisión que puede tomar un vehículo entre seguir ascendiendo por Palmas o tomar el retorno de Baltimore. Fuente: Elaboración propia.

Decisión: Palmas Ascendente Vs Retorno Baltimore

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

	Bicis	Motos	Carros	Buses	Camiones
Toman Retorno Baltimore	0.011628	0.143852	0.25246	0.197674	0.131579
Continúan en Palmas Ascendente	0.988372	0.856148	0.74754	0.802326	0.868421

Después, al correr varias simulaciones, se encontró que se debe originar las rutas de decisiones con una antelación significativa con el fin de que los vehículos prevean el próximo giro y así evitar congestiones innecesarias. En la Ilustración 15 y la Ilustración 16 se aprecia un ejemplo de la decisión Palmas Ascendente Vs Retorno Baltimore.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



*Ilustración 15. Ejemplo gráfico de la ruta que puede tomar un vehículo siguiendo por Palmas ascendente.
Fuente: Elaboración propia*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



*Ilustración 16. Ejemplo gráfico de la ruta que puede tomar un vehículo al voltear por el retorno de Baltimore.
Fuente: Elaboración propia*

4.2.5. Comportamiento de los conductores

Lo primero que se realizó, fue prohibir el tránsito de camiones y de bicicletas por el carril izquierdo de la vía las Palmas en sentido ascendente, ya que ese es el comportamiento observado. Cabe resaltar, que en ocasiones que se deba realizar un retorno, estos vehículos pueden transitar por este carril.

Adicionalmente, se modificó la forma en que se comportan las bicicletas en la vía para que estas transiten por la parte derecha del carril derecho cuando estén ascendiendo. De esta forma, se asemeja al comportamiento observado en el cual las bicicletas generalmente andan por la berma, teniendo poco impacto en el flujo vehicular. Sin embargo, se observó que en algunos casos esta regla no se cumplía a la perfección, y esto también es un comportamiento que se observa en la vía Las

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Palmas cuando un carro o una moto acompaña una bicicleta, interrumpiendo el flujo de los demás vehículos.

Por otro lado, se modificaron los comportamientos de adelantamiento: cuales vehículos pueden adelantar, la forma en la que se adelantan (por el carril izquierdo, derecho o ambos), que espacio necesitan para adelantarse. El comportamiento que se simuló tiene como referencia las siguientes reglas:

- Entre más ancho sea el tipo de vehículo, más espacio necesita para adelantarse y para ser adelantado.
- Las bicicletas solo se pueden adelantar por la derecha.
- Las motos se pueden adelantar por la derecha y por la izquierda.
- Los carros, buses y camiones solo se pueden adelantar por la izquierda. Aunque este no es siempre el caso, si este factor se habilitaba tanto para la izquierda como para la derecha, el comportamiento de los vehículos no se asemejaría a la realidad.
- En lugares donde se tengan bolardos flexibles ningún vehículo puede cambiar de carril.

Por último, se modificó para que todos los vehículos prevean la próxima decisión que tomarán.

4.2.6. Velocidades de recorrido

Las velocidades deseadas de recorrido fueron definidas en base a los comportamientos observados mediante un recorrido por la vía las Palmas equiparando las velocidades de las distintas categorías vehiculares. La categoría de carros y la categoría de motos fue definida por que se considera que la velocidad

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

deseada es el límite de velocidad. Los buses tienen una velocidad menor que los carros, pero mayor que los camiones. En la Tabla 14 se observa que la única categoría que tiene dos velocidades deseadas es la bicicleta. Esto es debido a que las bicicletas presentan una variación muy grande dependiendo del gradiente de la vía, comportamiento que difiere de los parámetros predeterminados de PTV Vissim. Por otro lado, si bien estas son las velocidades deseadas, esto se daría solamente si el vehículo está a flujo libre en una vía completamente plana y con la geometría apropiada, lo cual es muy distinto a las condiciones normales del modelo. En el modelo, el volumen vehicular, las reducciones de velocidad, el gradiente de la vía y la geometría vial entre otros, se encargan de restringir esta velocidad.

Tabla 14. Velocidades deseadas en el modelo por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Vehículo	Velocidad deseada (km/h)
Bicicletas Subiendo	12
Bicicletas Bajando	40
Motos	60
Carros, vans y busetas	60
Buses	40
Camiones	30

4.2.7. Áreas de reducción de velocidad

Las áreas de reducción de velocidad se dividen en cinco:

- **Pendientes:** las áreas de reducción de velocidad por pendientes se posicionaron exclusivamente en la Cola del Zorro sentido ascendente y Balsos sentido ascendente.
- **Cámaras de fotodetección:** la vía las Palmas cuenta con dos cámaras de fotodetección ubicadas cerca al Restaurante Chuscalito, en el km 7. Estas

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

cámaras tienen la capacidad de sancionar a los vehículos que transiten a más de 66 km/h, tanto en el sentido ascendente como en el descendente. Por esto, los conductores al llegar a este punto tienden a disminuir la velocidad. Esto fue simulado, y se redujo la velocidad a 50 km/h. A continuación, en la Ilustración 17 se observa una de las cámaras de fotodetección que regula esta vía.



Ilustración 17. Cámara de fotodetección en Chuscalito. Fuente: (Google, 2019)

- Efecto de estrechamiento: se debe a bolardos flexibles que separan algunos carriles de la vía las Palmas, generando una percepción disminuida del tamaño de la vía. Esto reduce el sentimiento de seguridad del conductor, haciendo así que su velocidad se vea afectada. Este valor fue simulado como una disminución de la velocidad a 30 km/h para las siguientes categorías: carros, vans y busetas; y motos. Para los vehículos pesados se redujo la velocidad a 20 km/h. Se consideró que las bicicletas no serán afectadas por estos bolardos. Adicional, estos elementos previenen que los vehículos cambien de carril, lo cual también fue modelado en PTV Vissim. A

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

continuación, en la Ilustración 18 se observan dichos bolardos flexibles. Por otro lado, la Cola del Zorro presenta disminuciones considerables del tamaño del carril, es por esto que se redujo la velocidad en el carril de descenso como se puede observar en la Ilustración 19.

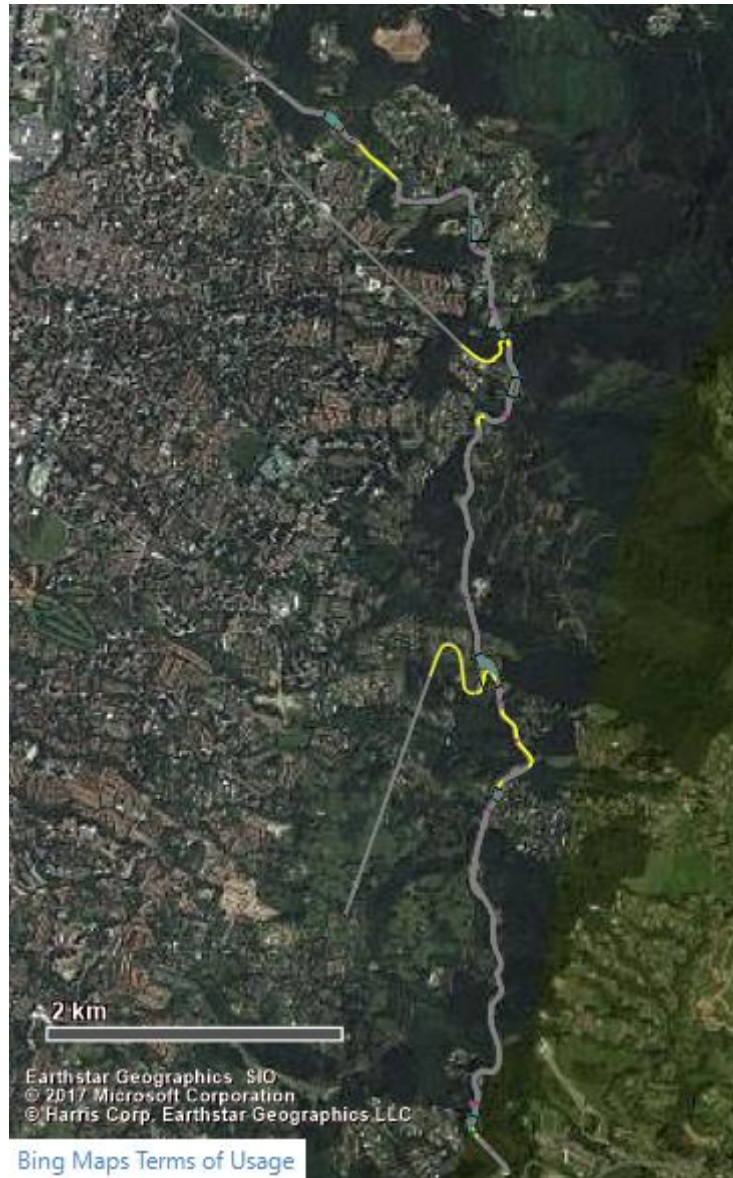


Ilustración 18. Ejemplo bolardos flexibles después del retorno de la Candelaria. Fuente: (Google, 2019)

- Conflicto en la toma de decisiones: este caso se da en un solo lugar de la simulación y es cuando los Balsos ascendente ingresa a las Palmas ascendente. En este punto, las Palmas cambia de dos carriles a un carril, y los Balsos tiene acceso directo por este carril. Sin embargo, por la forma en que se comporta el tráfico, acá la velocidad de los vehículos disminuye para evitar colisiones o inclusive para que los vehículos pesados cambien al carril derecho. Se simuló disminuyendo la velocidad a 30 km/h para todas las categorías vehiculares. En la Ilustración 19 está el resultado final de la geometría de la vía con todos los reductores de velocidad permanentes en

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

amarillo. Este resultado en mayor detalle se observa desde la Ilustración 20 hasta la Ilustración 23.



*Ilustración 19. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo.
Fuente: Elaboración propia.*

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

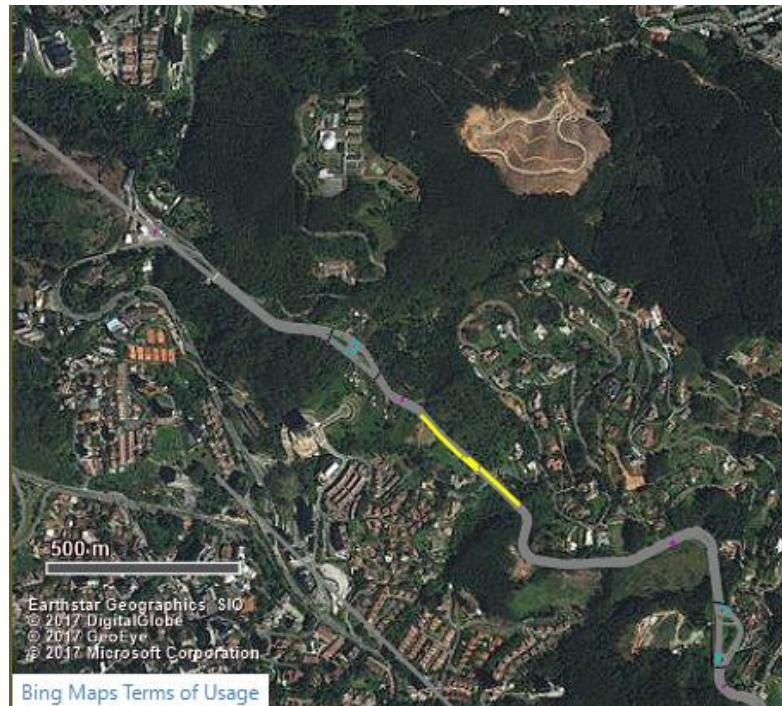


Ilustración 20. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo zona Baltimore. Fuente: Elaboración propia.

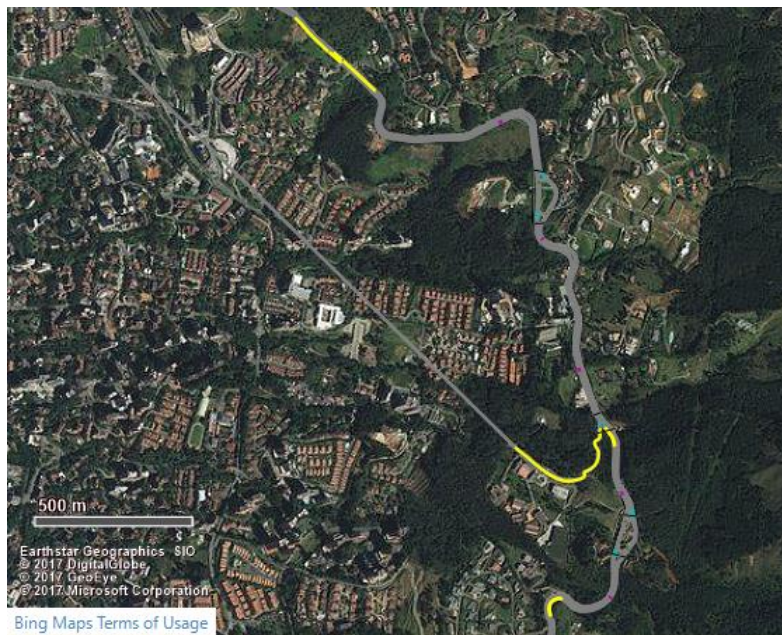


Ilustración 21. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo zona Cola del Zorro. Fuente: Elaboración propia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

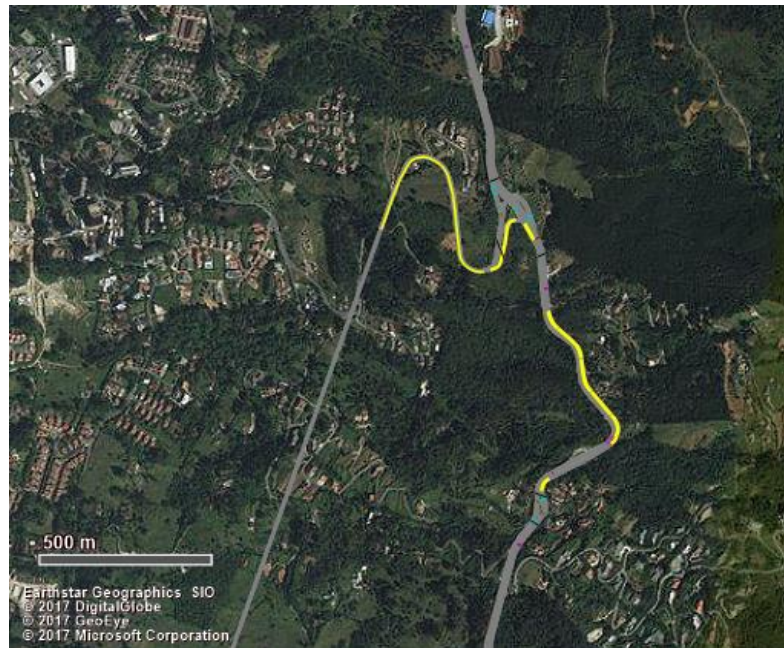


Ilustración 22. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo zona Balsos. Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 23. Diseño geométrico final del modelo en PTV Vissim con reductores de velocidad en amarillo zona Candelaria. Fuente: Elaboración propia.

- Por último, siempre que se simularon los incidentes de un carril, se le adicionó un reductor de velocidad al otro carril durante la duración del incidente. Este reductor de velocidad tiene dos objetivos: simular la reacción

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

sensacionalista por parte de los conductores cuando ven un incidente y simular el comportamiento que tomarían los conductores en caso de que haya obstáculos como vidrios en el piso o que el carril se estreche por culpa de este incidente. Por este motivo se redujo la velocidad de todos los vehículos a 5 km/h desde 50 metros antes del incidente, esto se puede ver en la Ilustración 24.



Ilustración 24. Reductores de velocidad en un incidente de un solo carril. Fuente: Elaboración propia.

4.2.8. Entradas vehiculares

Los vehículos que entran a la simulación se definieron basándose en los aforos realizados. Se utilizó el principio de continuidad para posicionar los vehículos aforados en los lugares necesarios para simular correctamente el modelo. Adicionalmente, en el título *4.1.2.1 Análisis de los aforos de tránsito* se halló la hora

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

de máxima demanda como un día de semana de 6:30 am a 7:30 am tanto en sentido ascendente como descendente.

Por otro lado, luego de hacer varias simulaciones se concluyó que, al estar simulando tiempos mayores a una hora en los incidentes en dos carriles con obstrucciones mayores a 20 minutos, se estaría incurriendo en una sobreestimación en caso de que todas las horas se simularan como la hora de máxima demanda. Adicionalmente, se encontró que las dos horas aforadas no fueron suficientes para representar las 3 horas y 30 minutos necesarias para la simulación de los incidentes más críticos. Por esta razón, fue necesario recurrir al Estudio de demanda vehicular del Túnel de Aburrá – Oriente (Steer Davies Gleave, 2009) para proyectar los aforos. La metodología empleada fue observar cómo se comportaba el perfil de demanda diaria para un jueves, y luego de acá encontrar una ecuación que correctamente represente los datos. Este perfil de demanda se observa en la Ilustración 25. Después de tener esta ecuación, se procedió a hallar la demanda vehicular en sentido ascendente para los horarios después de las 7:30 am. Para el sentido descendente, se proyectaron los resultados luego de las 8:30 am. Todo esto utilizando como referencia base, los resultados de los aforos realizados en el título *4.1 Recolección de datos* entre las 7:00 am y 8:00 am y asumiendo que se tiene un comportamiento similar a los aforos realizados en el Estudio de demanda vehicular del Túnel de Aburrá Oriente (Steer Davies Gleave, 2009). Por otro lado, en los casos en los que fue necesario prolongar los datos al horario de 5:30 am a 6:30 am para que fueran utilizados como calentamiento del modelo, se asumió que este rango de tiempo tiene la misma demanda que los datos de las 6:30 am. Se sabe que esto es una sobre estimación, sin embargo, se utilizó por motivos prácticos, teniendo en cuenta que estos valores solo serán utilizados en el calentamiento del modelo y por lo tanto no entrarán en los resultados. Una representación gráfica de los volúmenes horarios totales que entraron en la simulación se observa en la Ilustración 26.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

FIGURA 4.13 PERFIL DE DEMANDA DIARIA PARA EL JUEVES

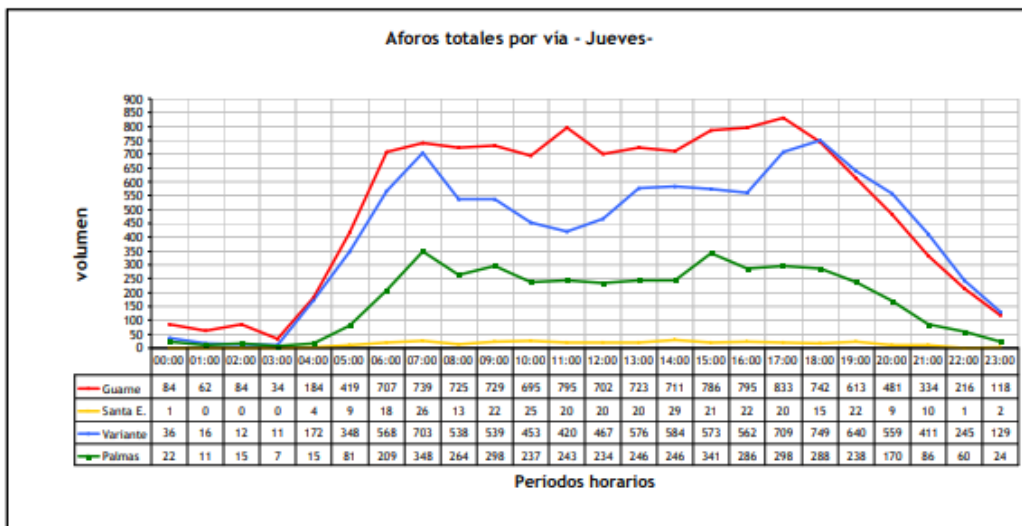


Ilustración 25. Perfil de demanda del Estudio de demanda vehicular del Túnel de Aburrá – Oriente para un jueves. Fuente: (Steer Davies Gleave, 2009).

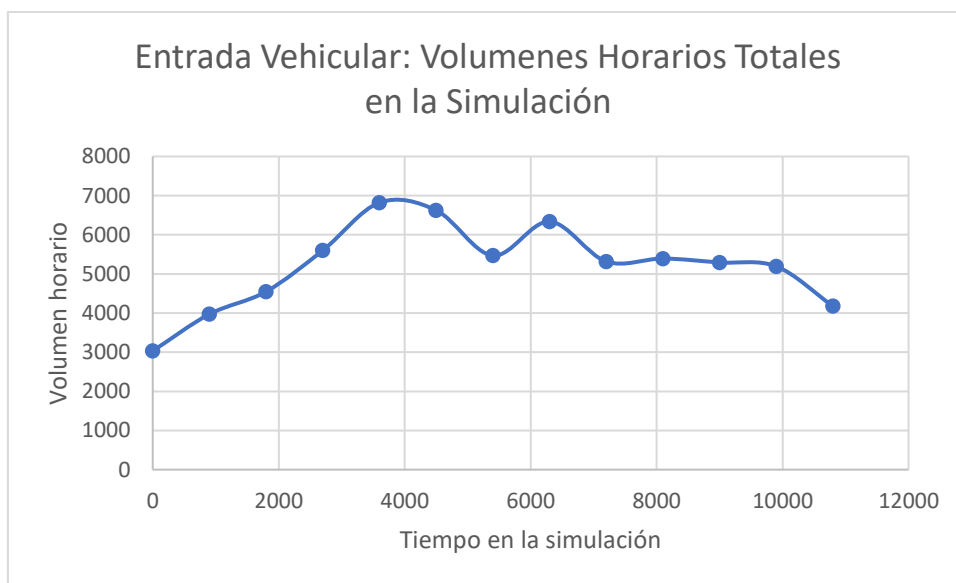


Ilustración 26. Entrada vehicular: volúmenes horarios totales en la simulación. Fuente: Elaboración propia.

Además, las entradas vehiculares se realizaron de forma exacta en lugar de seguir un proceso estocástico, para asegurar que el volumen de vehículos esperado La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

efectivamente transite por la vía. A pesar de esto, la simulación sigue siendo estocástica porque debe tomar decisiones como el orden en que entran los distintos tipos de vehículos a la simulación, afectando así los resultados.

Teniendo esto en cuenta, las entradas vehiculares se simularon cada 15 minutos, tal como se tomaron los aforos y considerando las proyecciones.

4.2.9. Tiempo total de la simulación

El tiempo total de la simulación es la suma entre el tiempo de precarga y el tiempo efectivo de la simulación. Este tiempo corresponde a 3 horas y 30 minutos para este modelo.

4.2.9.1. Tiempo de precarga

Haciendo las simulaciones de calibración, se encontró que el tiempo de recorrido promedio del trayecto completo de Palmas Ascendente para las bicicletas es de 45 minutos. Por esto, se consideró un tiempo de precarga de 60 minutos, lo cual va acorde con la recomendación de la FHWA (2004) que sugiere que sea mayor a 20 minutos. Además, este tiempo corresponde al horario de 5:30 am a 6:30 am aforado.

4.2.9.2. Tiempo efectivo de la simulación

Realizando simulaciones con incidentes críticos, se concluyó que el tiempo efectivo de la simulación será de 2 horas y 30 minutos puesto que esto es lo que se demora el flujo en normalizarse luego de habilitar el flujo. Este tiempo se utilizó sin importar la duración del incidente simulado, para así obtener resultados comparables.

4.2.10. Incidentes

La forma en la que se simularon los incidentes es como si fueran semáforos con distintos ciclos. En todos los casos los ciclos siguieron la siguiente estructura: la primera hora inicial en verde, luego el tiempo que se piensa bloquear en rojo y desde

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

el momento que se acaba el tiempo en rojo hasta el final de la simulación, otra vez en verde.

Se definieron cinco lugares distintos para los incidentes. La definición de estos puntos con sus diferentes nombres se encuentra en la Tabla 15 y en la Ilustración 27 se observa la georreferenciación de estos puntos.

Tabla 15. Nombre y descripción de los incidentes simulados. Fuente: Elaboración propia.

Nombre del Incidente	Descripción
DSC Post Balsos	Justo antes del retorno de Baltimore en sentido descendente
DSC Pre Balsos	Justo antes de la salida de Balsos en sentido de descendente
ASC Pre Cola	Justo antes de la Cola del Zorro en sentido ascendente
ASC Pre Balsos	Justo antes de la salida de Balsos en sentido ascendente
ASC Post Balsos	Justo antes del final del modelo en sentido ascendente

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

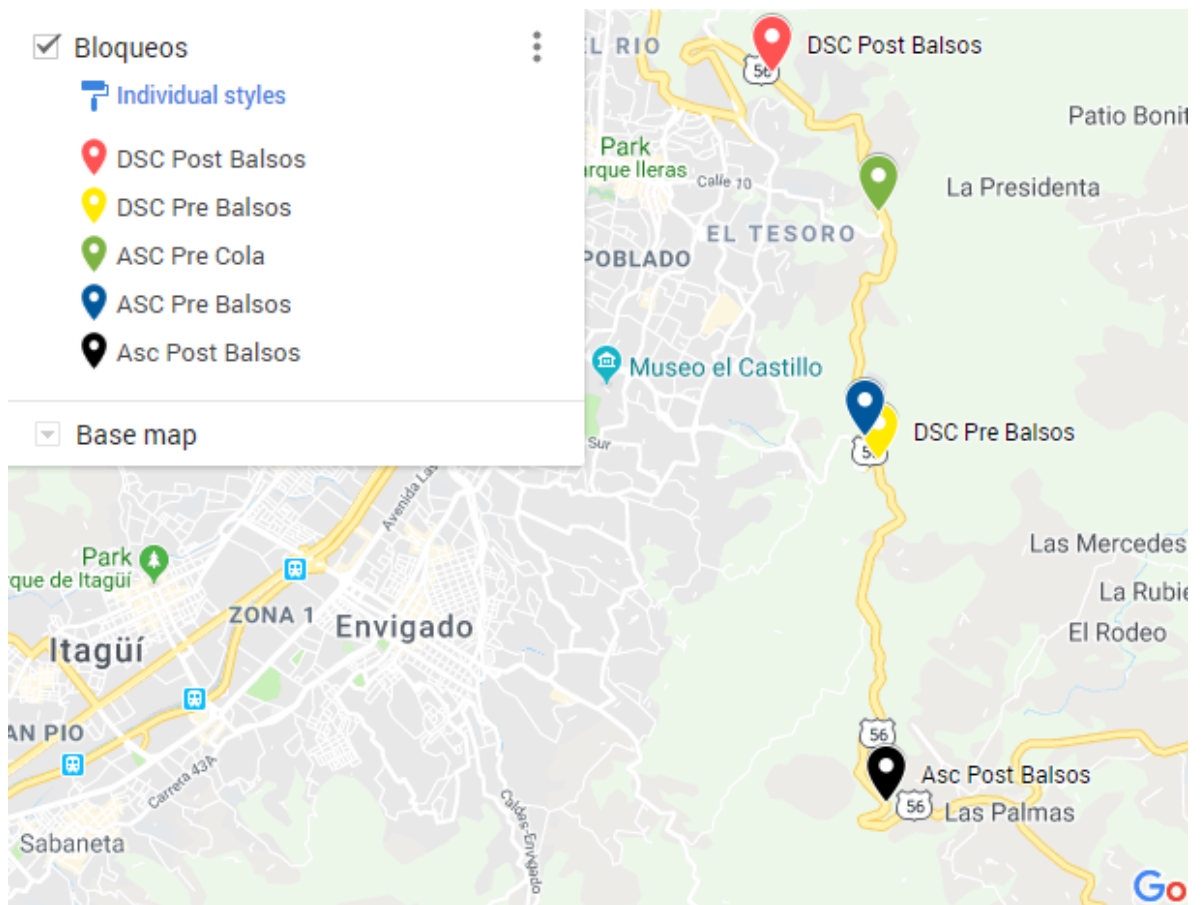


Ilustración 27. Georreferenciación de los incidentes. Fuente: Elaboración propia.

Adicional, se simularon 4 tiempos de incidente distintos para cada punto, de 10, 20, 30 y 40 minutos. Estas duraciones corresponden al tiempo de obstrucción. Si a esto se le suma el hecho de que se simularon dos tipos de incidente por punto y por duración de incidente, se tienen en total 40 distintos tipos de incidente. Los tipos de incidente fueron en un solo carril o en los dos carriles de la calzada. En caso de que fueran incidentes de un solo carril, se restringió la velocidad del flujo para que este comportamiento se asemeje más a la realidad; el detalle de esto se observa en el título 4.2.7

Tipo de Vehículo	Velocidad deseada (km/h)
------------------	--------------------------

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Bicicletas Subiendo	12
Bicicletas Bajando	40
Motos	60
Carros, vans y busetas	60
Buses	40
Camiones	30

Áreas de reducción de velocidad.

4.2.11. Variables de calibración

Se calibró tanto con tiempos de recorrido de los vehículos como con volúmenes de tráfico. Los resultados completos de esta calibración se encuentran en *ANEXO B. Calibración del Modelo*.

4.2.11.1. Tiempos de recorrido

En los tiempos de recorrido, se basó en la información proporcionada por Google Maps, para poder concluir si el tiempo de recorrido promedio si está en el rango proporcionado por Google Maps. Para esto, se tomaron los resultados de cuatro recorridos a las 6:30 am y a las 7:30 am. Estos recorridos son: todo el tramo vial de las Palmas modelado en sentido ascendente, el recorrido desde la Cola del Zorro hasta el tramo más lejano modelado en las Palmas en sentido ascendente, el recorrido desde la parte inferior modelada de los Balsos en sentido ascendente hasta el tramo más lejano modelado en las Palmas y todo el tramo vial de las Palmas modelado en sentido descendente. Un resumen de estos resultados se observa en la Tabla 16. Posteriormente, en la Tabla 17 se puede concluir que los resultados obtenidos en la hora de máxima demanda de la simulación se encuentran correctamente dentro de los rangos de la Tabla 16. Es importante tener en cuenta que los valores en los que el tiempo de viaje aparece como cero es porque este tipo de vehículo no realizó este recorrido.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 16. Tiempo promedio de los recorridos en el horario de máxima demanda proporcionado por Google Maps. Fuente: (Google, 2019).

Recorrido	6:30 AM	7:30 AM
ASC Palmas Total	12-20 min	12 - 20 min
ASC Cola del Zorro Total	10-16 min	10-18 min
ASC Balsos Total	7-12 min	7-14 min
DSC Palmas Total	10-14 min	10-14 min

Tabla 17. Tiempos de viaje promedio por tipo de vehículo encontrados en PTV Vissim. Fuente: Elaboración propia.

Recorrido	Tiempo de Viaje Promedio Por Tipo de Vehículo (minutos)					
	Todos	Bicicletas	Motos	Carros, vans y busetas	Buses	Camiones
ASC Palmas Total	14.3	45.4	11.4	14.3	20.8	21.2
ASC Cola del Zorro Total	12.3	37.4	9.6	12.2	16.2	0.0
ASC Balsos Total	8.3	26.2	6.9	8.3	10.9	10.6
DSC Palmas Total	10.9	0.0	10.1	10.6	13.9	17.4

4.2.11.2. Volumen de tráfico

Para el volumen de tráfico, se utilizó la metodología de calibración de GEH, en la cual se comparó el volumen de tráfico real, en los lugares en que se tomaron los aforos vehiculares, con el volumen de tráfico registrado por PTV Vissim en estos mismos lugares. Estas comparaciones se hicieron en el periodo de máxima demanda. Acá se obtuvo que en un 98.5% de los casos el GEH era menor a 5. Además, solo en un punto el GEH fue mayor a 5, sin embargo, en ningún caso el GEH fue mayor a 10. Teniendo en cuenta estos resultados y siguiendo el criterio de calibración de modelos de Wisconsin (FHA, s/f-b), es correcto afirmar que esta simulación está calibrada. En la Tabla 18 se muestran los valores de GEH obtenidos en la última simulación realizada para calibrar el modelo. Cabe resaltar que los

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

valores en los cuales aparece “No Aplica” es porque en los aforos vehiculares reales no se registraron vehículos en este periodo de tiempo

Tabla 18. Resumen de los valores de GEH encontrados para los distintos puntos aforados. Fuente: Elaboración propia.

Punto	Descripción	GEH				
		60 Bicis	70 Motos	10 Carros	30 Bus	20 Cam
1.1	Entran por Cola del Zorro	1.0	0.2	0.5	0.0	No Aplica
1.2	Salen por Cola del zorro	0.5	1.4	1.5	1.8	No Aplica
1.3	Palmas Asc antes de la Cola del Zorro	0.4	0.9	0.0	0.4	1.1
1.4	Entran por Balsos	0.0	4.8	5.3	0.5	0.3
1.5	Salen por Balsos	0.5	1.1	1.4	1.9	1.4
2.2	Palmas Desc en Entre Maderos	4.7	1.1	2.0	0.3	0.4
2.3	Salen por Balsos	3.8	0.8	0.6	No Aplica	0.0
3.1.1	Retorno Baltimore Asc	No Aplica	1.5	0.6	1.2	No Aplica
3.1.2	Retorno Baltimore Desc	0.0	0.0	1.0	0.2	1.8
3.2.1	Retorno Latino Asc	No Aplica	1.4	1.1	No Aplica	0.8
3.2.2	Retorno Latino Desc	0.0	0.6	2.7	1.4	0.0
3.3.1	Retorno Musical Asc	No Aplica	No Aplica	0.0	No Aplica	No Aplica
3.3.2	Retorno Musical Desc	0.8	0.6	1.4	1.6	0.8
3.4.1	Retorno CAI Asc	No Aplica	No Aplica	1.2	No Aplica	1.4
3.4.2	Retorno CAI Desc	0.6	1.3	0.8	0.5	1.2

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

3.5.1	Retorno Candelaria Asc	1.4	No Aplica	1.8	No Aplica	No Aplica
3.5.2	Retorno Candelaria Desc	No Aplica	0.9	1.2	No Aplica	No Aplica

Una vez concluidas las simulaciones se recolectó y organizó los resultados en el *ANEXO D. Resultados de red.*

4.3. Análisis de incidentes

A continuación, se presenta la determinación de los factores necesarios para los cálculos de los excesos de costos con base a la metodología presentada.

4.3.1. Cálculo de exceso de costos por congestión

Una vez terminada la simulación de todos los posibles escenarios se procedió al cálculo de los excesos de costos de movilización producidos por cada escenario. Los excesos de costos se calculan con la Ecuación 8,

$$\Delta CM_n = CM_{Rn} - CM_i$$

Ecuación 8

Donde:

ΔCM_n : Exceso de costos de movilización para el escenario n

CM_{Rn} : Costos de movilización reales para el escenario n

CM_i : Costos de movilización para el caso ideal

Los excesos de costos son la diferencia entre los costos de movilización de un escenario desfavorable como lo son todos los escenarios con incidentes, y un escenario ideal, sin incidentes, que es como la vía se comporta normalmente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4.3.1.1. Excesos de costos sociales asociados al costo de oportunidad

La fórmula cuenta con dos variables principales que dependen del tipo de vehículo que se está evaluando y son: OC_k : Tasa de ocupación promedio para el tipo de vehículo k y VST_k : Valor subjetivo del tiempo para el tipo de vehículo k . La tasa de ocupación promedio para el tipo de vehículo significa la cantidad de personas en promedio que viajan por categoría vehicular.

El estudio de Muñoz Puentes (2014), presenta resultados de estos dos factores deducidos aplicados a la ciudad de Bogotá, para los vehículos particulares, buses y transporte pesado. Luego, a partir de datos de la SDM (Secretaría Distrital Movilidad), se estimó la tasa de ocupación por medio de un promedio ponderado de la siguiente Tabla 19.

Tabla 19. Tasa de ocupación del vehículo particular. Tomada de (Muñoz Puentes, 2014).

ESTACIÓN MAESTRA	OCUPACIÓN VEHICULO PARTICULAR						PROMEDIOS
	1	2	3	4	5	6	
AC 68 S X AK 41	7477	6098	1646	661	276	149	16307
	46%	37%	10%	4%	2%	1%	100%
	7477	12196	4938	2644	1380	894	29529
							1,81
AK 45 X AC 127	83949	36576	8228	3156	745	257	132911
	63%	28%	6%	2%	1%	0%	100%
	83949	73152	24684	12624	3725	1542	199676
							1,50
AC 45 S X AK 68	11834	448	1948	578	175		14983
	79%	0%	1%	0%	0%	0%	81%
	11834	896	5844	2312	875	0	21761
							1,45
							1,53

Para la estimación del OC_k para los buses se dispuso del “Estudio de Movilización de Pasajeros en Rutas Urbanas de la Ciudad Mediante Aforos de Registradoras” realizado por el Consorcio SYM (2013) para la Secretaría de Movilidad de Medellín.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En este estudio, se presentaban tablas categorizadas por empresa prestadora de servicios de bus/buseta y microbús de movilización de pasajeros por empresa en un día ordinario promedio y también de despachos por empresa en un día ordinario promedio. Con esta información se procedió a dividir pasajeros diarios sobre el número de despachos para conseguir el número promedio de pasajeros por despacho. En la Tabla 20 se muestran los datos recolectados y el promedio calculado

Tabla 20. Movilización y despacho de buses por empresa Fuente: (Consortio Sym, 2013))

Bus/Buseta	Movilización de pasajeros por empresa en un día ordinario promedio	Despachos por empresa en un día ordinario promedio.	Pasajeros por Despacho
Empresa			
AUTOBUSES EL POBLADO LAURELES SA	98472	2310	42.63
AUTOCOL	164	17	9.65
COINVETRANS	6445	221	29.16
COMBUSES	50578	1371	36.89
CONALTRACOOP	1836	101	18.18
CONDUCCIONES AMERICA	46646	1590	29.34
CONDUCCIONES PALENQUE ROBEDAL	47890	1339	35.77
COOMETROPOL LTDA	6039	243	24.85
COONATRA LTDA	106312	2519	42.20
COOPCERQUIN	188	22	8.55
COOPETRANSA LTDA	24618	815	30.21
COOPTRANSNOR	242	24	10.08
COOTRABEL	35665	828	43.07
COOTRACOVI	0	0	
COOTRAGRANIZAL	173	16	10.81
COOTRAMO	2910	105	27.71
COOTRAMOB	0	0	
COOTRANBLAN	1221	50	24.42
COOTRANSCATALUNA	222	30	7.40
COOTRANSCOL	0	0	
COOTRANSI	0	0	

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

COOTRANSMALLAT	281	33	8.52
COOTRANSPINAL	375	31	12.10
COOTRANSVI	6032	159	37.94
COOTRASANA	31087	533	58.32
COPATRA LTDA	38501	1187	32.44
COTRANSMON	6420	152	42.24
EXPRESO CAMPO VALDES	5696	262	21.74
FLOTA LA ""V"" SCA""	27027	1068	25.31
FLOTA LA MILAGROSA	16716	636	26.28
FLOTA NUEVA VILLA	13611	460	29.59
INVETRANS	317	11	28.82
RAPIDO SAN CRISTOBAL	4567	147	31.07
SANTRA	24967	712	35.07
TAX MAYA SA	821	25	32.84
TRANSCONOR	306	20	15.30
TRANSPORTES ARANJUEZ SANTA CRUZ SA	35989	953	37.76
TRANSPORTES CASTILLA	11279	391	28.85
TRANSPORTES LA MAYORITARIA GUAYABAL LTDA	26347	765	34.44
TRANSPORTES MEDELLIN	94993	2361	40.23
TRASANCOOP	6111	141	43.34
		Promedio	28.46

La tasa de ocupación se obtiene entonces de un promedio de todos los pasajeros/despacho para todas las empresas de buses del estudio, obteniendo como resultado $OC_3 = 28.4$. A manera de comparación: la tasa de ocupación de buses deducido por Muñoz Puentes (2014) en Bogotá fue de 29.17 pasajeros/vehículo.

Para la determinación de la tasa de ocupación de las motocicletas se acudió a un estudio realizado por el Centro de Investigación Estadístico de la Universidad Privada Domingo Savio (2013) en donde se presenta la siguiente Tabla 21. Se seleccionó entonces el valor de $OC_2 = 1.31$.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 21. Cantidad estimada de personas en las motocicletas observadas. Fuente: (Universidad Privada Domingo Savio, 2013)

Cuadro No. 5.3		
Cantidad estimada de personas en las motocicletas observadas		
Media	1,31	Pasajeros por motocicleta
Mediana	1	Pasajeros por motocicleta
Moda	1	Pasajeros por motocicleta
Desv. tip.	0,53	Pasajeros por motocicleta
Mínimo	1	Pasajeros por motocicleta
Máximo	4	Pasajeros por motocicleta
Coefficiente de variación %	41%	
Fuente: Centro de Investigación estadística de la Universidad Privada Domingo Savio		

La tasa de ocupación del transporte pesado no se calculó pues su valor está implícito cuando se estima el valor subjetivo del tiempo, el cual se toma como un costo de oportunidad de la carga transportada (Muñoz Puentes, 2014), para efectos del cálculo la tasa de ocupación se fija a 1. Muñoz, toma dicho valor del estudio de tránsito para el corredor portuario de la ciudad de Barranquilla, realizada por proyectos técnicos 2011. Finalmente, para las bicicletas se asumió una tasa de ocupación de 1 pasajero por bicicleta. El resumen de las tasas de ocupación, OC_k , seleccionados se presentan en la Tabla 22 a continuación:

Tabla 22. Tasas de ocupación por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Vehículo	OC_k
Bicis	1
Motos	1.31
Particulares	1.53
Buses	28.46
Camiones	1

A continuación, se determinó la variable VST_k o valor subjetivo del tiempo por tipo de vehículo. Para esto se acudió al Estudio de Demanda del Túnel Aburrá – Oriente

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

(Steer Davies Gleave, 2009) donde a través de encuestas, se hizo una caracterización de los usuarios de la vía Palmas. El resultado principal de las encuestas de preferencias declaradas dentro del contexto del estudio de la demanda del túnel fue el valor subjetivo del tiempo de viaje, entendido como la disponibilidad a pagar por ahorros de tiempo. Este concepto es equiparable al de la tasa marginal de sustitución entre dinero y tiempo en la función de utilidad del viaje (Steer Davies Gleave, 2009). A continuación, se presentan la Tabla 23 y Tabla 24 de valores subjetivos del tiempo dependiendo del propósito de viaje.

Tabla 23. Valores del tiempo. Fuente: (Steer Davies Gleave, 2009)

Segmento	Valor del tiempo (\$/min) 2009	Valor del tiempo (USD/hora) Octubre 2009
Destino Trabajo	193,3	5,7
Regreso al Hogar	349,2	10,4
Destino aeropuerto a viajar	899,7	26,9
Recreación	146,0	4,4
Todos los viajeros	220,3	6,6
Combinado usuarios auto	198,4	5,9

Tabla 24. Valor del tiempo. Fuente: (Steer Davies Gleave, 2009)

Segmento	Valor del tiempo (\$/min)
Aeropuerto	899,7
Trabajo	193,3
Recreación	146
Otros	349,2

Además, por medio de la encuesta se encontró que: el 19% de los individuos encuestados viajó por motivo de trabajo, el 24% por gestiones de trabajo, 36% por

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

ocio/recreación, el 10% por ir al aeropuerto, 4% por hogar y el 7% por otras razones, así como se aprecia en la Ilustración 28.

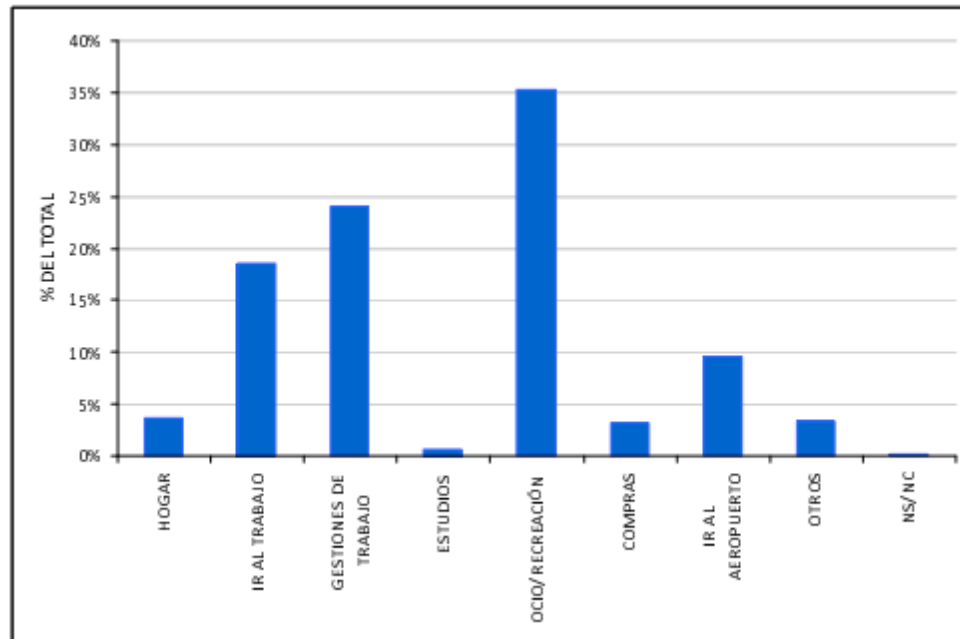


Ilustración 28. Distribución por motivos de viaje. Fuente: (Steer Davies Gleave, 2009)

Después, conociendo la distribución por motivo de viaje, y el valor del tiempo por motivo de viaje, se hizo un promedio ponderado para encontrar un valor del tiempo para un usuario promedio del tramo. Fue necesario ajustar por inflación, pues los valores presentados son para el 2009: según Dinero en el Tiempo (2019), “la tasa de inflación promedio de Colombia entre los años 2009 y 2019 ha sido del 3.66% anual. En total, la moneda presentó un aumento del 43.27% entre estos años. Esto quiere decir que 1 peso colombiano (COP) de 2009 equivale a 1.43 pesos colombianos de 2019”, encontrando entonces la siguiente Tabla 25

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 25. Valores del tiempo ajustados por inflación y valor promedio del tiempo. Fuente: Elaboración propia.

Segmento	Valor del tiempo (\$/min) 2009	Valor del tiempo (\$/min) Hoy	% de los viajes	Valor x %viajes
Aeropuerto	899.7	1286.571	10%	128.6571
Hogar	349.2	499.356	4%	19.97424
Trabajo	193.3	276.419	43%	118.86017
Recreación	146	208.78	36%	75.1608
Otros	349.2	499.356	7%	34.95492
		Promedio ponderado (\$/min)	100%	377.60723

Para vehículos particulares, motos y buses se asumió el valor subjetivo del tiempo como el resultado del promedio ponderado expuesto anteriormente. Para las bicicletas se asumió que el 100% de sus motivos de viaje eran de recreación/ocio, y finalmente para los camiones se tomó el mismo valor subjetivo del tiempo que Muñoz Puentes (2014), el resumen de los valores subjetivos del tiempo por tipo de vehículo se presente en la siguiente Tabla 26.

Tabla 26. Resumen de valores subjetivos del tiempo por tipo de vehículo. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de Vehículo	Valor del tiempo (\$/min)
Carros particulares	377.6
Camión	1000
Bus	377.6
Bicis	208.78
Motos	377.6

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4.3.1.2. Excesos de costos de operación

- **Gasto adicional de gasolina**

Para poder hacer uso de la fórmula presentada en la metodología, fue necesario determinar el valor de la gasolina por galón sin impuesto. Según Diaz (2018) el precio de la gasolina es de \$9,560/galón y los cuatro impuestos sobre la gasolina son: el impuesto nacional a la gasolina y el ACPM; el impuesto al carbono; el IVA; y la sobretasa. Estos cuatro impuestos suman \$2.918 por galón equivalentes al 30% de lo que se paga en la estación de servicio. En la Ilustración 29 se muestra el desglose del precio de la gasolina en Colombia. El precio de la gasolina sin impuestos tomado para el desarrollo de la ecuación fue de 6,698.3 \$/galón.



Ilustración 29. Desglose del precio de la gasolina en Colombia. Fuente: (Diaz 2018)

Luego, el factor C_{60} corresponde al consumo en gal/km a una velocidad de 60 km/h por tipo de vehículo. “En España, según SARMIENTO & ROBUSTÉ (1999) se usaba 8,2 lt por cada 100 Km de recorrido para vehículos livianos y para vehículos pesados 13,0 lt por cada 100 Km” (Muñoz Puentes, 2014). Convertidos a gal/km resulta 0.0216 gal/km para vehículos livianos y 0.0343 gal/km para vehículos livianos. Para La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

los buses se aprovechó la “Consultoría para la actualización de costos de mantenimiento de vehículos de transporte público colectivo y rendimiento de combustible; insumo para el cálculo de la tarifa año 2012” elaborado por (Giraldo Trejos, 2012). Se tomó el rendimiento de 31 buses de distintas compañías para obtener un valor promedio del rendimiento de la gasolina. Se concluyó entonces que el rendimiento promedio de un bus de Medellín era de 10.42 km/gal o .0959 gal/km. (Giraldo Trejos, 2012). Se tomó el rendimiento de 31 buses de distintas compañías para obtener un valor promedio del rendimiento de la gasolina. Se concluyó entonces que el rendimiento promedio de un bus de Medellín era de 10.42 km/gal o .0959 gal/km.

- **Gasto adicional de lubricante**

Para la determinación del valor del lubricante simplemente se buscó el valor de un galón de lubricante genérico en una tienda de Colombia. Se encontró un galón de lubricante en MercadoLibre por 85,000 \$ (Mercadolibre, s/f).

- **Gasto adicional de mantenimiento**

Para esta fórmula no se tenía un factor con necesidad de investigar ya que el valor del mantenimiento ya estaba incluido en la fórmula y era el valor de \$360, que surge de convertir una constante de 24 pesetas en pesos colombianos (Muñoz Puentes, 2014), para este valor se ajustó por inflación de acuerdo con la conversión presentada anteriormente según Dinero en el Tiempo (2019), resultando en un valor de 514.8.

Las bicicletas, al no disponer de motor de combustión, no se le asignó un valor de consumo de gasolina, lubricante, y exceso de mantenimiento se asumió como nulo.

4.3.1.3. Excesos de costos por contaminación

La fórmula de determinación de costos por contaminación tiene dos factores importantes: F_k = Factor de contaminación según el tipo de vehículo. Para livianos [La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.](#)

es 1 y para pesados en 3,76 (en el caso del Monóxido de Carbono) y el factor (Ca / Ta) que es igual a \$28/veh-km, que surge de convertir una constante de 1,87 pesetas/veh-km en pesos colombianos. “Se requieren estudios en Colombia para determinar ese valor, y por eso se empleará esa aproximación utilizada en SARMIENTO & ROBUSTÉ (1999) para vehículos livianos en España” (Muñoz Puentes, 2014). Este último factor se ajustó por inflación resultando en 40.04 \$/veh-km.

4.3.2. Resultados obtenidos

Una vez se procesó los resultados de las simulaciones con las ecuaciones para calcular los excesos de costos, se organizaron los costos para cada tipo de incidente discriminado por tipo de exceso de costo en el *ANEXO E. Cálculos y análisis de costos*. Luego se graficaron los excesos de costos por tipo de incidente, ubicación y sentido del flujo. Las gráficas antedichas se presentan en las próximas 10 ilustraciones, desde la Ilustración 30 hasta la Ilustración 39. El comportamiento general de los incidentes concuerda con lo esperado que a medida que el incidente aumenta, los excesos de costos también.

Además, es significativo aclarar que, de los costos evaluados anteriormente, todos los costos de operación (Gasto adicional de combustible, lubricante y mantenimiento) son costos individuales que los asume el conductor, mientras que los excesos de costos por contaminación son enteramente sociales porque los asume la sociedad. Los excesos de costos sociales asociados al costo de oportunidad son asumidos por los individuos o por la sociedad dependiendo del motivo del viaje, por ejemplo, para los viajes de recreación se enteramente asumidos por el individuo, pero para los viajes con destino al aeropuerto los excesos de costos son asumidos por la sociedad como una menor productividad del viajero, pero también el individuo debe asumir el costo del tiquete de avión perdido.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

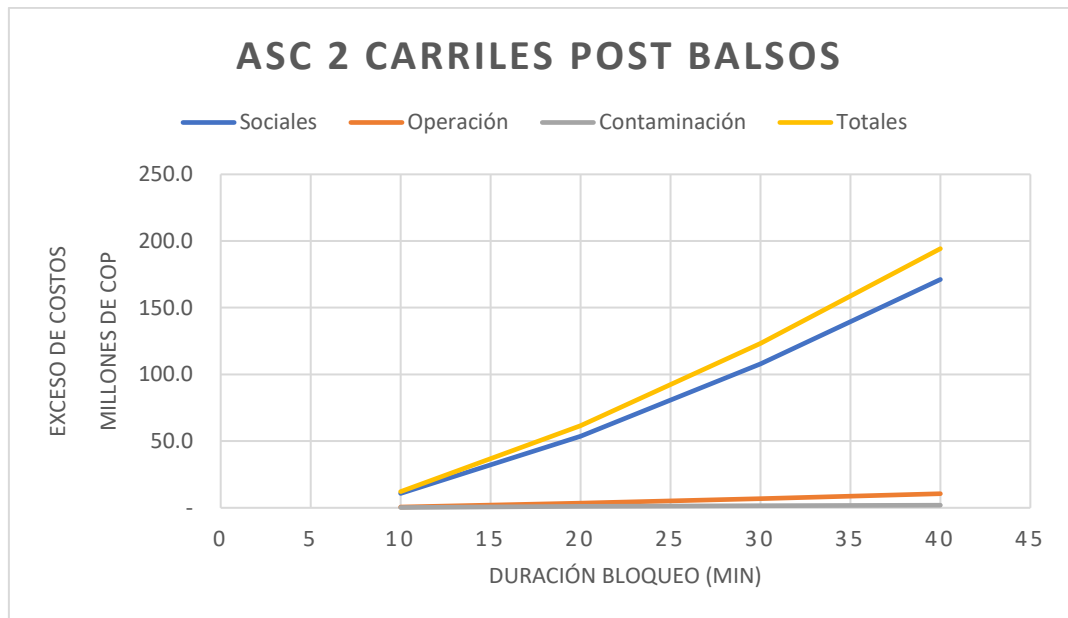


Ilustración 30. Excesos de costos para un incidente de dos carriles posterior a Balsos en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.

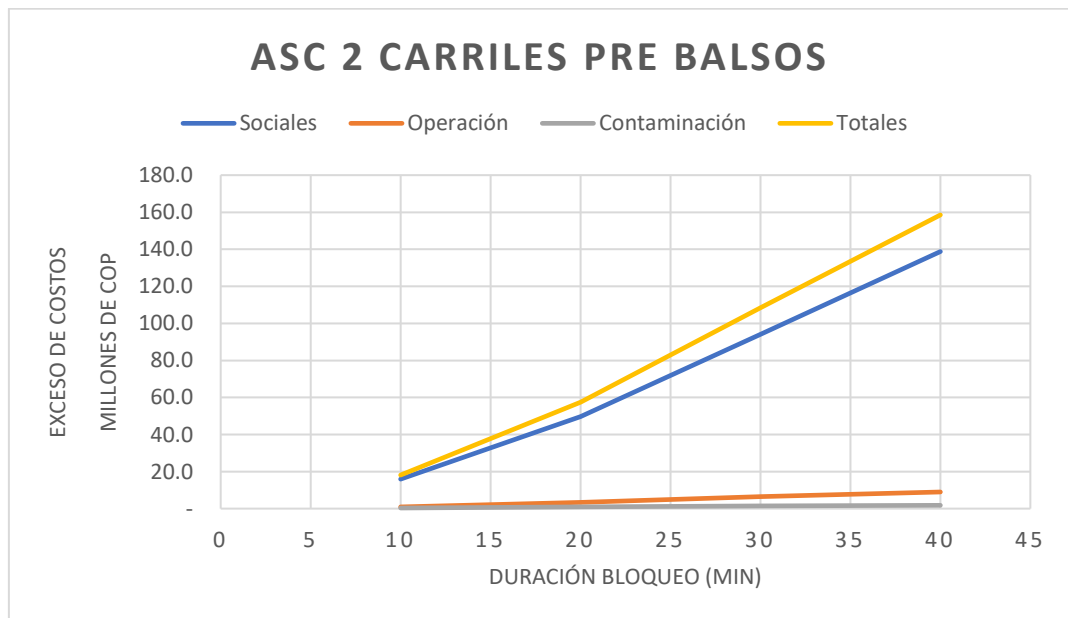


Ilustración 31. Excesos de costos para un incidente de dos carriles anterior a Balsos en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

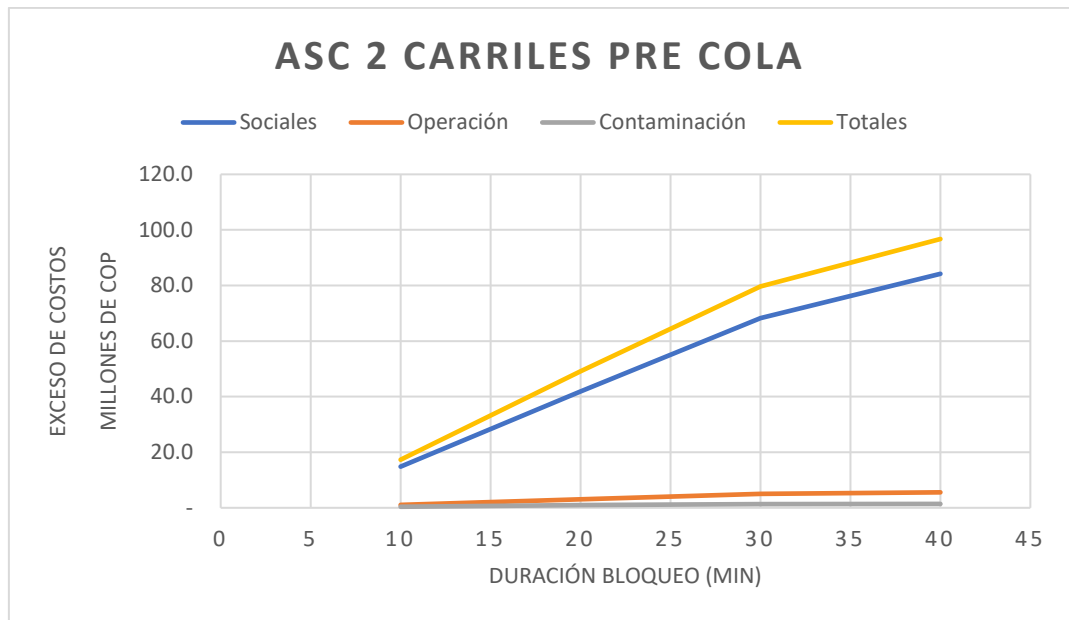


Ilustración 32. Excesos de costos para un incidente de dos carriles anterior a la Cola del Zorro en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.

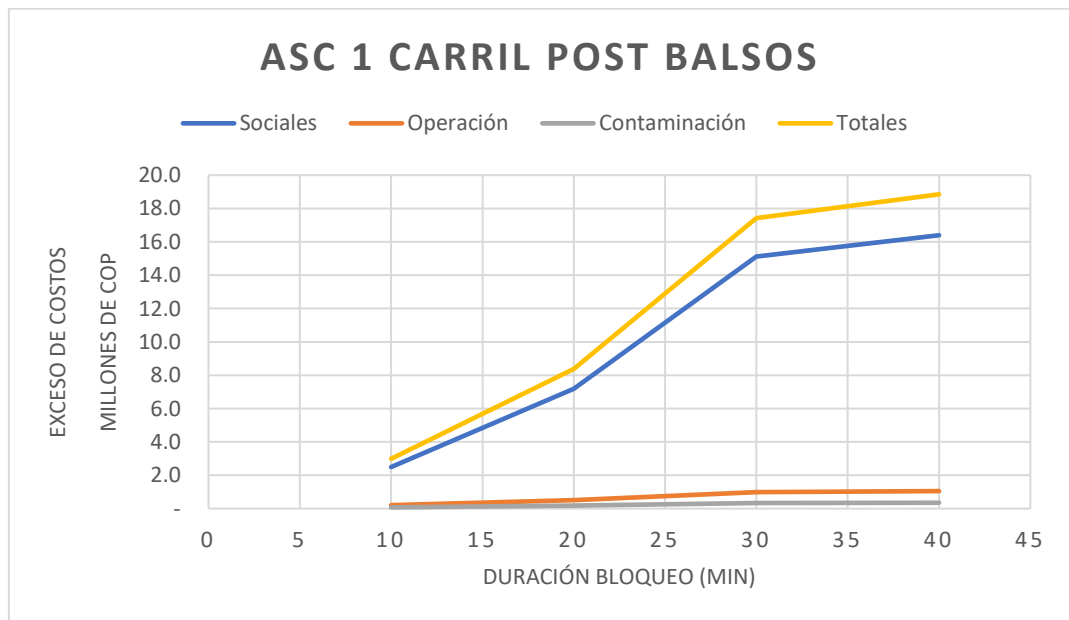


Ilustración 33. Excesos de costos para un incidente de un carril posterior a Balsos en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

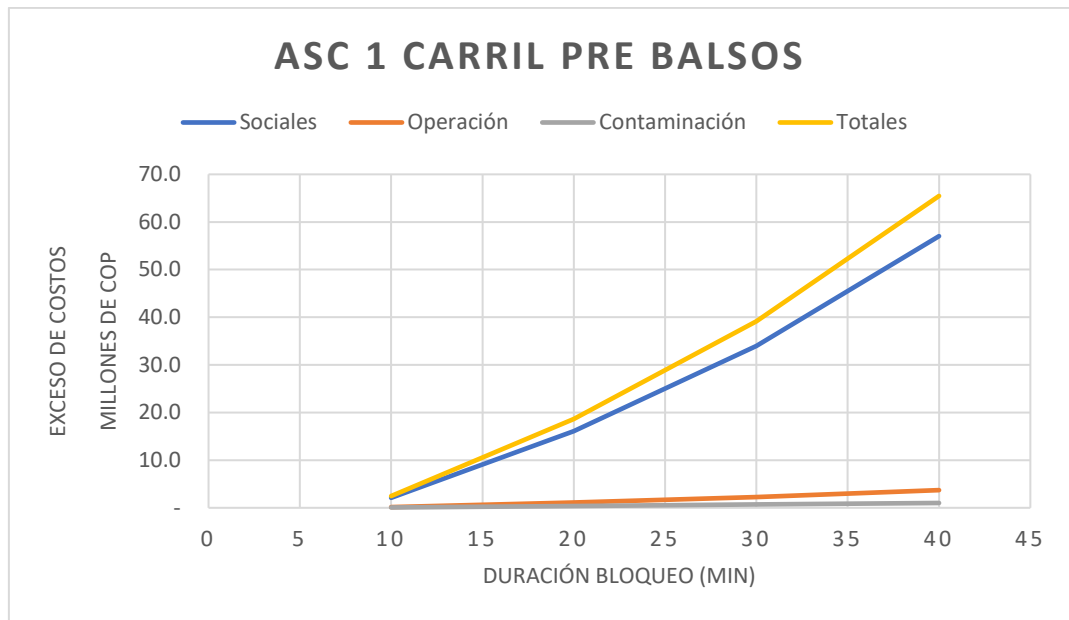


Ilustración 34. Excesos de costos para un incidente de un carril anterior a Balsos en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.

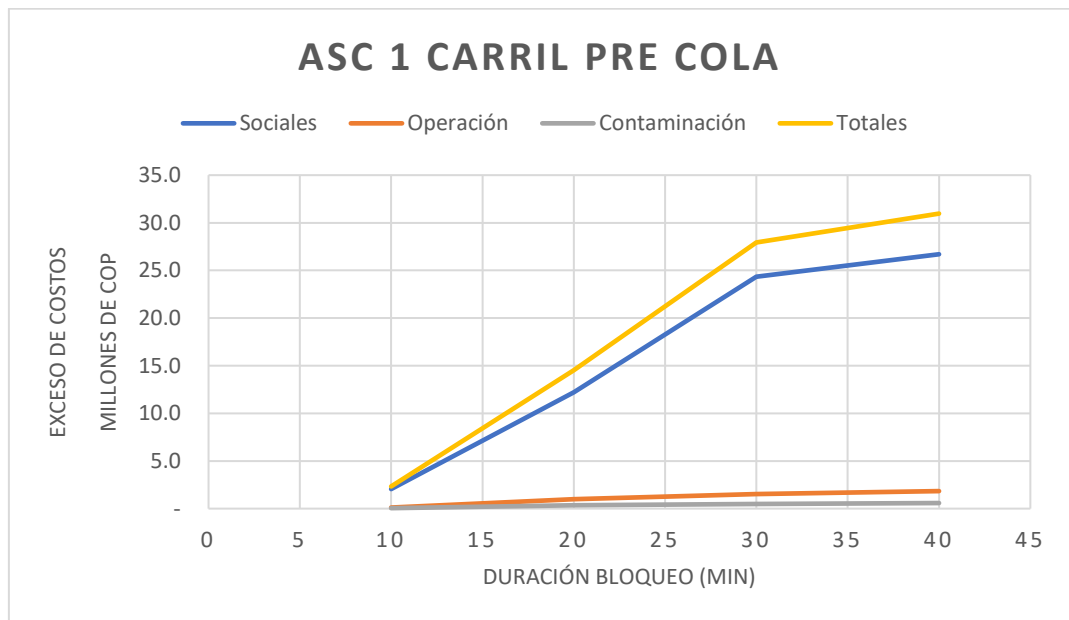


Ilustración 35. Excesos de costos para un incidente de un carril anterior a la Cola del Zorro en el sentido ascendente. Fuente: Elaboración propia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

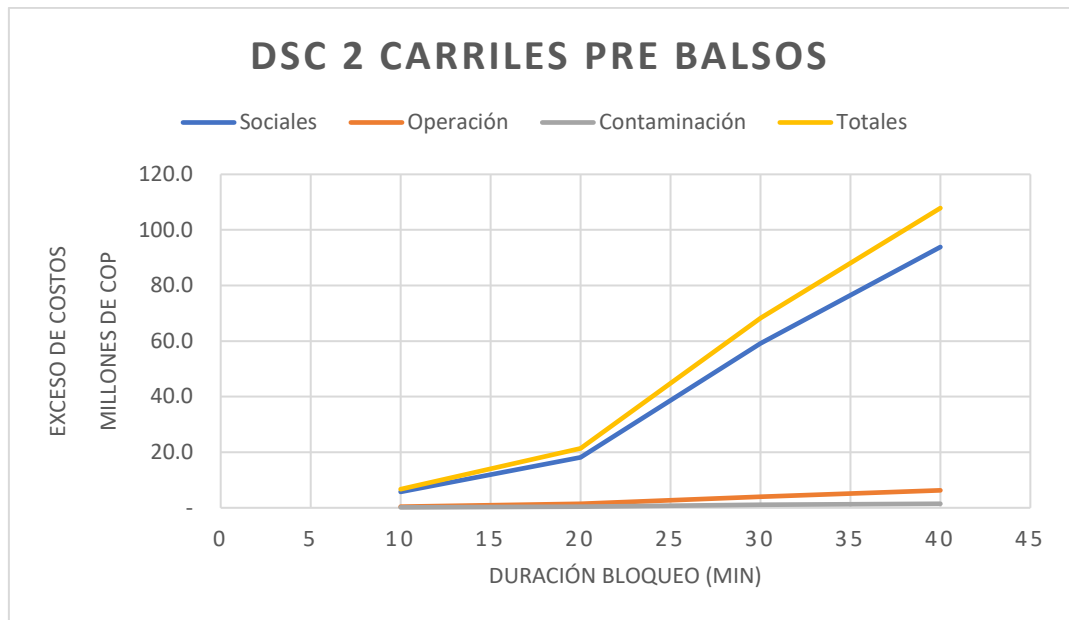


Ilustración 36. Excesos de costos para un incidente de dos carriles anterior a Balsos en el sentido descendente. Fuente: Elaboración propia.

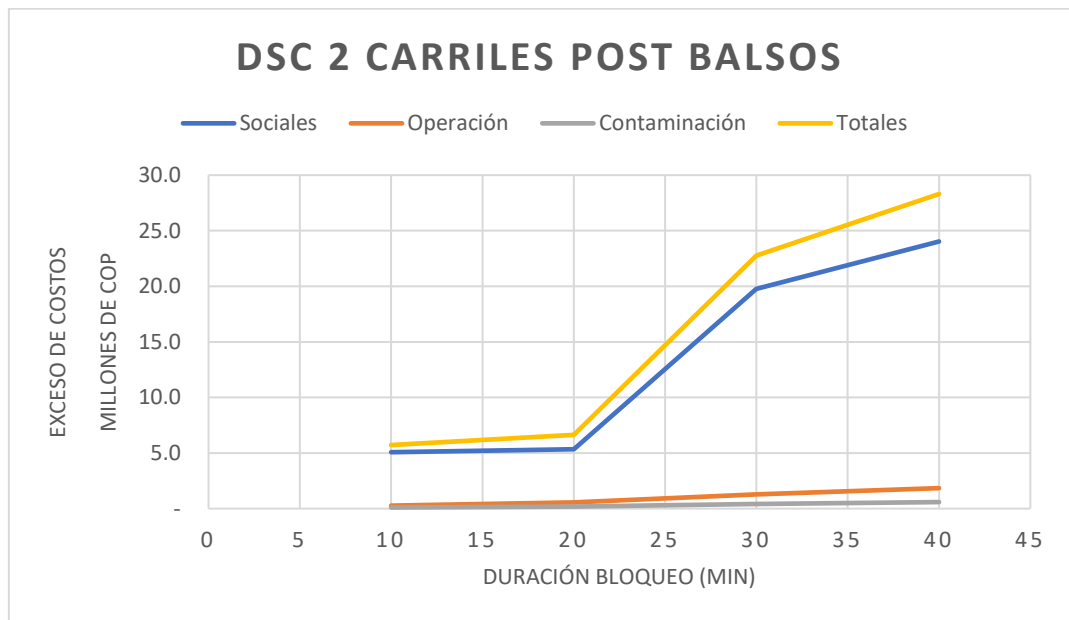


Ilustración 37. Excesos de costos para un incidente de dos carriles posterior a Balsos en el sentido descendente. Fuente: Elaboración propia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

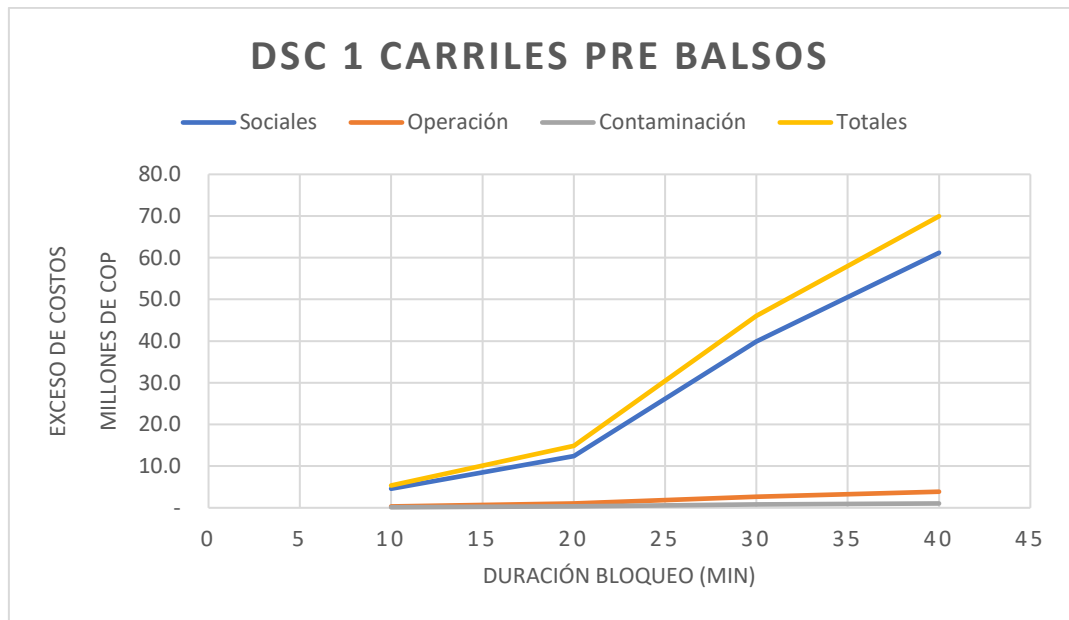


Ilustración 38. Excesos de costos para un incidente de un carril anterior a Balsos en el sentido descendente.
Fuente: Elaboración propia.

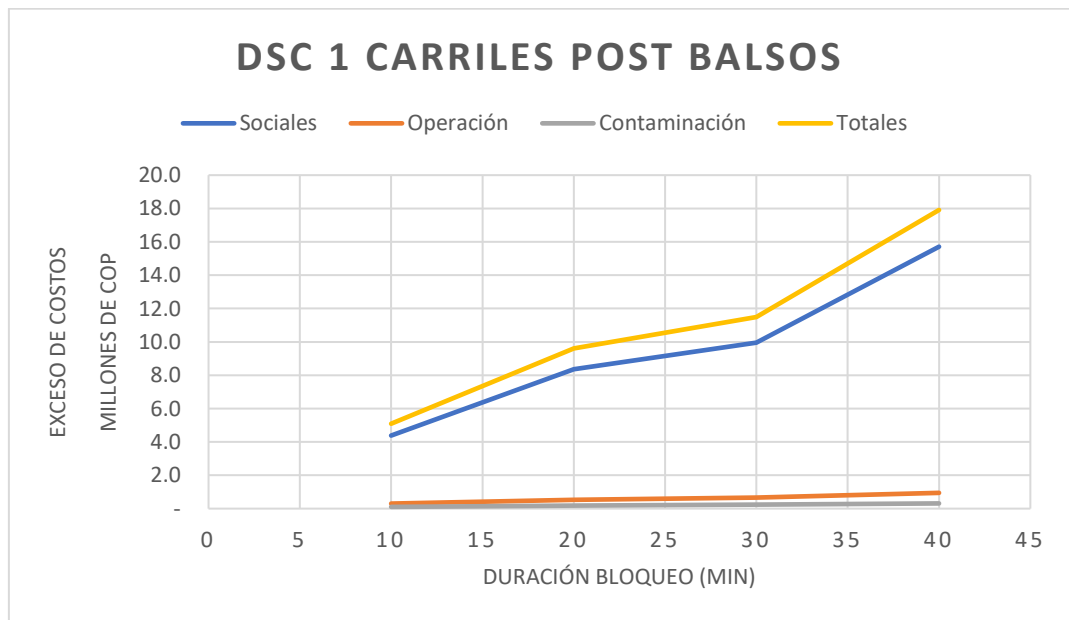


Ilustración 39. Excesos de costos para un incidente de un carril posterior a Balsos en el sentido descendente.
Fuente: Elaboración propia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se puede apreciar que, para distintos puntos y tipos de incidente, las pendientes de las gráficas varían, por ejemplo: en la Ilustración 37 se presenta el gráfico de los excesos de costos para un incidente de dos carriles posterior a Balsos en el sentido descendente, y se ve claramente la distinción entre las pendientes entre los puntos, el incremento de excesos de costo al pasar de un incidente de 10 minutos a uno de 20 minutos es de aproximadamente 1,560,000 COP, luego, de 20 minutos a 30 minutos es de aproximadamente 8,300,000 COP, y finalmente de 30 minutos a 40 minutos es de 5,540,000 COP, es importante aclarar que estos son excesos de costos generales totales. Esto significa que, para un incidente en esta zona, transcurrido los primeros 20 minutos de incidente, los excesos de costos aumentan a una mayor a una mayor tasa, volviendo de vital importancia atender este tipo de incidentes para esta zona en 20 minutos o menos.

También se puede apreciar el minúsculo impacto que tienen los excesos de costos por operación y por contaminación comparado con los excesos de costos sociales. En el *ANEXO E. Cálculos y análisis de costos* se presenta la tabla de resultados con todos los costos discriminados, el caso más crítico para los costos de operación se presenta con un incidente de 40 minutos de dos carriles en el sentido ascendente posterior a balsos, con excesos de costos de operación que ascienden a aproximadamente 10,500,000 COP, equivalentes al 5.4% del total de excesos de costos para el mismo incidente. Es importante aclarar que las pendientes de las pasadas gráficas cambian cada 10 minutos porque se evaluaron incidentes de 10, 20, 30 y 40 minutos de duración, lo que significa una variación de 10 minutos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En las siguiente Tabla 27 y Tabla 28 se presentan los excesos de costos totales para cada ubicación y duración del incidente.

Tabla 27. Excesos de costos totales para incidentes de dos carriles por ubicación y duración del incidente.
Fuente: Elaboración propia.

Dos Carriles		
Ubicación	Tiempo Obstrucción (min)	Totales (COP)
ASCPPostBalsos	40	194,283,134.5
	30	123,284,278.3
	20	61,651,553.1
	10	12,133,926.9
ASCPreBalsos	40	158,538,586.3
	30	108,464,712.1
	20	57,395,865.0
	10	18,139,721.3
ASCPreCola	40	96,731,029.3
	30	79,692,585.8
	20	49,084,380.4
	10	17,304,513.1
DSCPreBalsos	40	107,863,385.4
	30	68,244,126.6
	20	21,428,272.2
	10	6,693,618.3
DSCPostBalsos	40	28,307,003.0
	30	22,771,122.8
	20	6,648,308.5
	10	5,720,998.2

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 28. Excesos de costos totales para incidentes de un carril por ubicación y duración del incidente.
Fuente: Elaboración propia.

Un Carril		
Ubicación	Tiempo Obstrucción (min)	Totales (COP)
ASCPPostBalsos	40	18,851,757.6
	30	17,416,947.2
	20	8,382,306.3
	10	2,988,580.8
ASCPPreBalsos	40	65,461,608.7
	30	39,161,517.9
	20	18,652,404.3
	10	2,464,975.8
ASCPPreCola	40	30,966,544.2
	30	27,920,351.0
	20	14,516,105.1
	10	2,329,323.8
DSCPPreBalsos	40	69,947,018.3
	30	46,005,872.7
	20	14,888,679.9
	10	5,352,836.2
DSCPPostBalsos	40	17,912,837.3
	30	11,496,972.1
	20	9,610,863.1
	10	5,092,928.2

De las tablas anteriores se puede deducir que los 10 incidentes más críticos o costosos son los siguientes, presentados en la Tabla 29:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 29. Excesos de costos para los casos más críticos. Fuente: Elaboración propia.

Tipo Incidente	Ubicación	Tiempo Obstrucción (min)	Totales (COP)
Doble	ASCPPostBalsos	40	194,283,134.5
Doble	ASCPreBalsos	40	158,538,586.3
Doble	ASCPPostBalsos	30	123,284,278.3
Doble	ASCPreBalsos	30	108,464,712.1
Doble	DSCPreBalsos	40	107,863,385.4
Doble	ASCPreCola	40	96,731,029.3
Doble	ASCPreCola	30	79,692,585.8
Sencillo	DSCPreBalsos	40	69,947,018.3
Doble	DSCPreBalsos	30	68,244,126.6
Sencillo	ASCPreBalsos	40	65,461,608.7

Se puede apreciar que entre los 10 casos más críticos predominan los incidentes de 40 minutos, ocupando 6/10 puestos. Este resultado es de esperarse pues, entre más duradero sea el incidente, una mayor cantidad de vehículos se verán afectados por él. Cabe notar que los otros 4 resultados corresponden a incidentes de 30 minutos, 3 correspondientes a los escenarios de incidentes de dos carriles en sentido ascendente, y solo 1 para incidentes de dos carriles en sentido descendente, una posible explicación para este comportamiento es que, por la ubicación del incidente, las filas que se alcanzan a formar por congestión llegan hasta retornos y/o entradas de flujo vehicular, fenómeno que no sucede cuando los incidentes se ubican lejos de estos elementos. Otro ejemplo de este fenómeno es que un incidente de dos carriles de 40 minutos en el sentido descendente posterior a balsos, considerablemente alejado del retorno Latino, es 39,937,123.6 COP menos costoso que el mismo incidente de dos carriles, pero de 30 minutos de duración anterior a Balsos, que se encuentra más cerca del retorno del CAI, en el mismo sentido descendente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Es evidente que los mayores excesos de costos se ven asociados a incidentes de dos carriles ocupando 8 de 10 puestos de la tabla anterior, porque con dos carriles bloqueados se acumulan más los vehículos y se extienden más las filas, a comparación de los incidentes de solo un carril en donde también se restringe el flujo, pero se permite un flujo lento por el carril libre. También, son predominantes los incidentes ubicados en el sentido ascendente, ocupando 7 de los 10 puestos de la tabla anterior, esto se debe a que en hora pico, los mayores flujos se presentan en sentido ascendente.

Analizando las gráficas presentadas anteriormente se observan 3 tipos de gráficas: el primer tipo es del comportamiento de incrementos constantes semejando una sola pendiente, este comportamiento se puede observar en la Ilustración 30, Ilustración 31, Ilustración 32, e Ilustración 34, este tipo de comportamiento se le llamará de **pendiente constante**. Luego, están las gráficas que tienen una disminución significativa en la pendiente después de los 30 minutos de duración del incidente. Este tipo de comportamiento se puede observar en la Ilustración 33 e Ilustración 35, este tipo de comportamiento se le llamará de **pendiente aplanada**. Por último, están las gráficas que presentan un incremento drástico posterior después de que la duración del incidente supera los 20 minutos (con la excepción de la Ilustración 39 que aumenta su pendiente luego de 30 minutos), este comportamiento se puede observar en la también en la Ilustración 36, Ilustración 37, Ilustración 38, e Ilustración 39, a este tipo de comportamiento se le llamará de **pendiente empinada**.

Finalmente, se presentan los 10 escenarios menos críticos o con menos excesos de costos asociados en la siguiente Tabla 30:

Tabla 30. Excesos de costos para los casos más críticos. Fuente: Elaboración propia.

Tipo Incidente	Ubicación	Tiempo Obstrucción (min)	Totales (COP)
----------------	-----------	--------------------------	---------------

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Sencillo	DSCPostBalsos	20	9,610,863.1
Sencillo	ASCPPostBalsos	20	8,382,306.3
Doble	DSCPreBalsos	10	6,693,618.3
Doble	DSCPostBalsos	20	6,648,308.5
Doble	DSCPostBalsos	10	5,720,998.2
Sencillo	DSCPreBalsos	10	5,352,836.2
Sencillo	DSCPostBalsos	10	5,092,928.2
Sencillo	ASCPPostBalsos	10	2,988,580.8
Sencillo	ASCPPreBalsos	10	2,464,975.8
Sencillo	ASCPPreCola	10	2,329,323.8

Se observa un comportamiento opuesto al analizado anteriormente para los casos más críticos. Los escenarios menos críticos se presentan generalmente para los incidentes de solo un carril y para el sentido descendente. Es de interés notar que los incidentes en sentido ascendente ocupan ambos puestos de escenarios más y menos críticos, lo que sugiere que la tasa de crecimiento de los excesos de costos para esos escenarios es más crítica.

4.3.2.1. Sentido ascendente

A continuación, se presenta una serie de graficas en las Ilustración 40 e Ilustración 41, organizadas en el sentido de los flujos ascendentes, para incidentes de dos y un carril respectivamente, con el propósito de analizar cómo se incrementan o decrementan los excesos de costos a diferentes alturas de las Palmas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

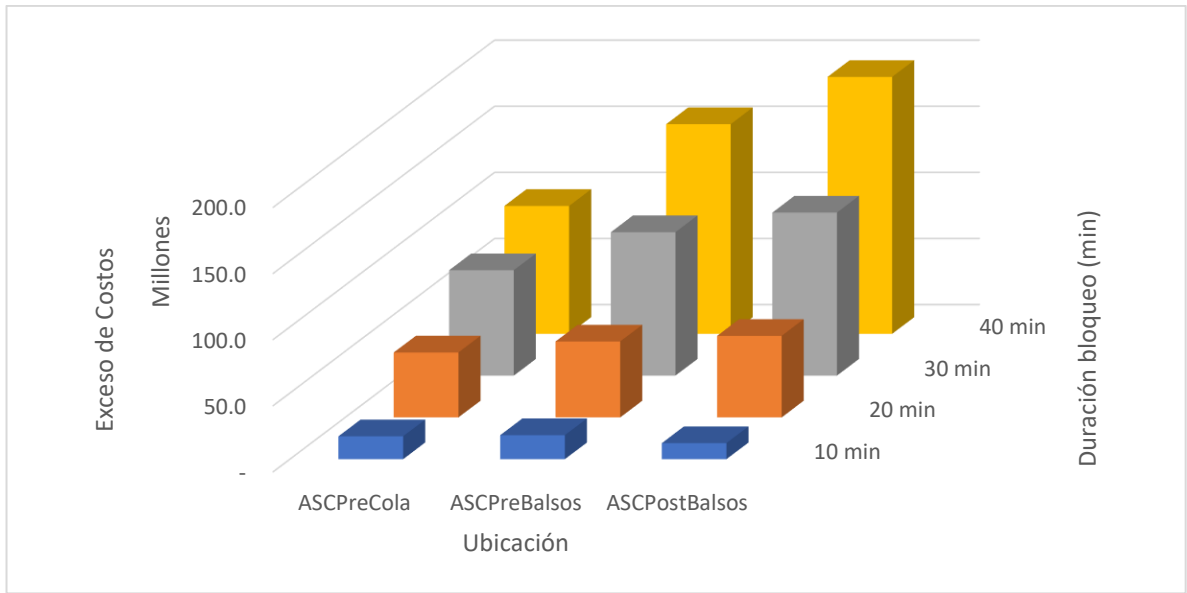


Ilustración 40. Excesos de costos de incidentes de dos carriles en sentido ascendente por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.

A medida que el incidente se sitúa más adelante en sentido ascendente de Las Palmas los excesos de costos totales van aumentando también, puesto que los flujos aumentan considerablemente para el sentido ascendente, posterior al ingreso de los Balsos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

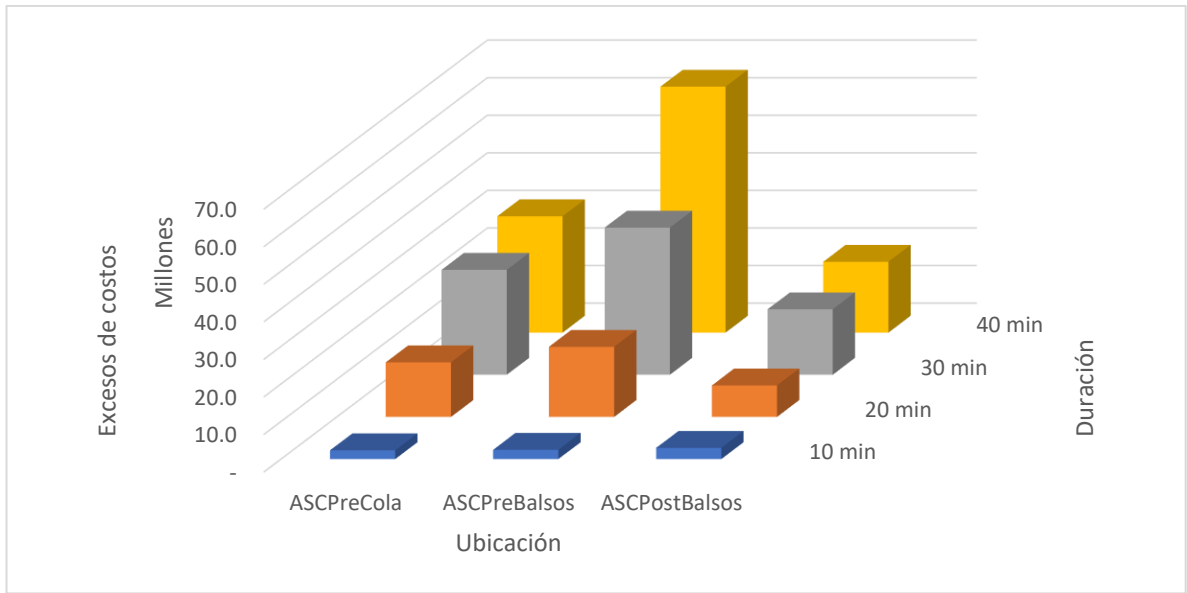


Ilustración 41. Excesos de costos de incidentes de un carril en sentido ascendente por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de los incidentes de un solo carril para el sentido ascendente presenta resultados alejados de los esperados. El segmento más crítico para un incidente de un solo carril se ubica en la mitad de La Cola del Zorro y de Los Balsos. También, son mayores los excesos de costos para los incidentes de un solo carril ubicados anterior a la Cola del Zorro que para incidentes de un solo carril posterior a Balsos.

4.3.2.2. Sentido ascendente

A continuación, se presenta una serie de graficas en las Ilustración 42 e Ilustración 43, organizadas en el sentido de los flujos descendentes, para incidentes de dos y un carril respectivamente, con el propósito de analizar cómo se incrementan o decrecientan los excesos de costos a diferentes alturas de las Palmas.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

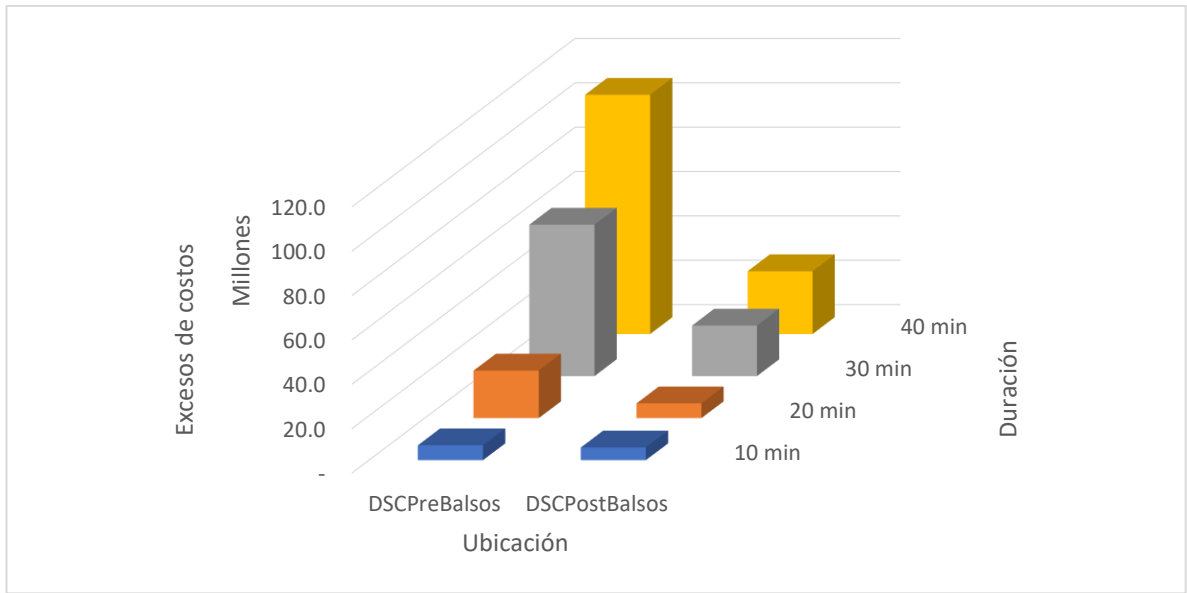


Ilustración 42. Excesos de costos de incidentes de dos carriles en sentido descendente por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.

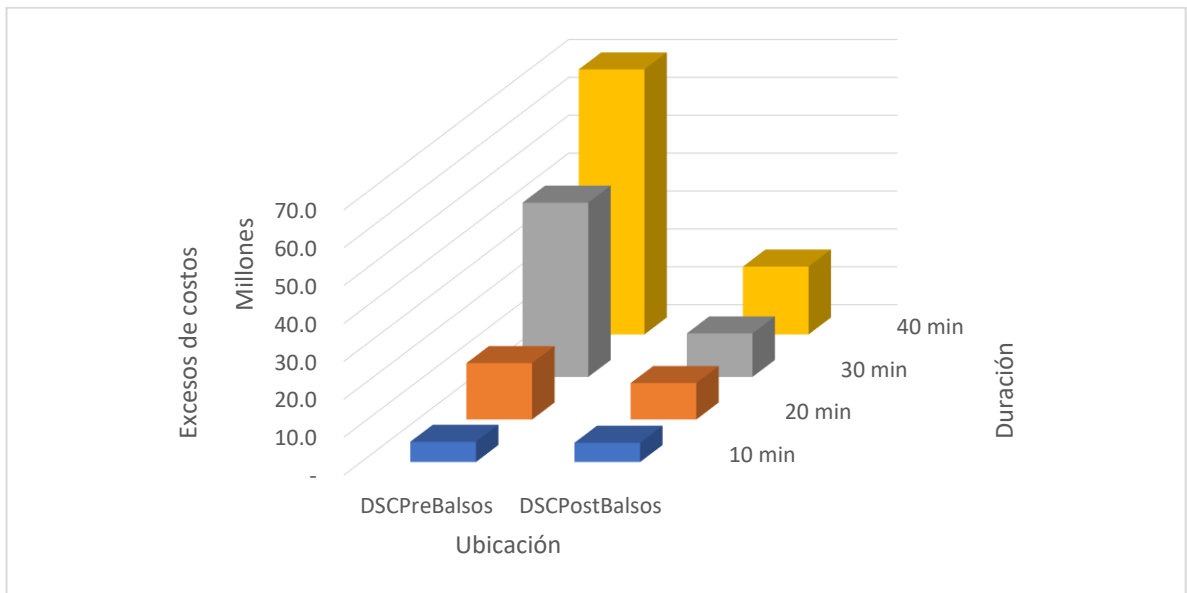


Ilustración 43. Excesos de costos de incidentes de un carril en sentido descendente por ubicación y duración del incidente. Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de los incidentes de dos carriles y de un solo carril en el sentido descendente son muy similares. Se presenta el caso crítico en ambos tipos de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

incidente para el segmento anterior a Balsos en el sentido descendente, debido a la proximidad del retorno del CAI al sitio del incidente, la fila por la congestión alcanza a atascar el retorno, a medida que la fila se va extendiendo por el carril izquierdo del otro sentido por vehículos esperando a tomar el retorno, llega el punto en el que un vehículo que se moviliza por el carril derecho también desea ingresar, efectivamente bloqueando ambos carriles del sentido opuesto al incidente simulado.

4.3.2.3. Excesos de costos por zonas de Las Palmas

Para este análisis se tomó el caso más crítico para cada zona de Las Palmas, en todos los casos fueron los escenarios de incidentes de dos carriles de 40 minutos de duración. Posteriormente, se clasificó por colores los excesos de costos totales para todos los casos, asignando un color rojo vivo al caso más crítico y uno verde al menos como se muestra en la Tabla 31, y así crear un mapa donde cada zona está representada por su color correspondiente. El mapa zonificado por colores se puede apreciar en la Ilustración 44.

Tabla 31. Caso más crítico por zona de Las Palmas codificado por colores. Fuente: Elaboración propia.

Tipo Incidente	Ubicación	Tiempo Obstrucción	Tipo Incidente
Doble	ASCPPostBalsos	40	194,283,134.5
	ASCPPreBalsos		158,538,586.3
	DSCPreBalsos		107,863,385.4
	ASCPPreCola		96,731,029.3
	DSCPostBalsos		28,307,003.0

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 44. Representación por colores de los casos más críticos por zonas en Las Palmas. Fuente: Elaboración propia.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se puede generalizar entonces que los mayores excesos de costos están asociados a la calzada en sentido ascendente. Esto se puede explicar por diversos motivos: el primero es que la pendiente del sentido hace que la reanudación del flujo vehicular, posterior a detenerse por completo producto del incidente, sea más difícil ya que los vehículos cuentan con una mayor resistencia para acelerar, causando congestiones adicionales y finalmente disminuyendo las velocidades promedio. Otra explicación es los mayores flujos en sentido ascendente que en descendente, al tener mayores flujos las congestiones se ven agravadas y consigo los costos también.

4.3.2.4. Composición de costos sociales e individuales

Para el caso más crítico (caso del incidente de dos carriles posterior a balsos de 40 minutos de duración) identificado anteriormente se procedió a realizar un desglose de la composición de costos sociales dependiendo del motivo del viaje, lo mismo se realizó para el escenario base, los resultados se presentan en la Ilustración 45 para el escenario crítico y para el escenario base en la Ilustración 46, los valores numéricos se presentan en la Tabla 32. Cabe notar que, para el escenario más crítico, se está evaluando los excesos de costos, mientras que para el escenario base se muestran los costos bases.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

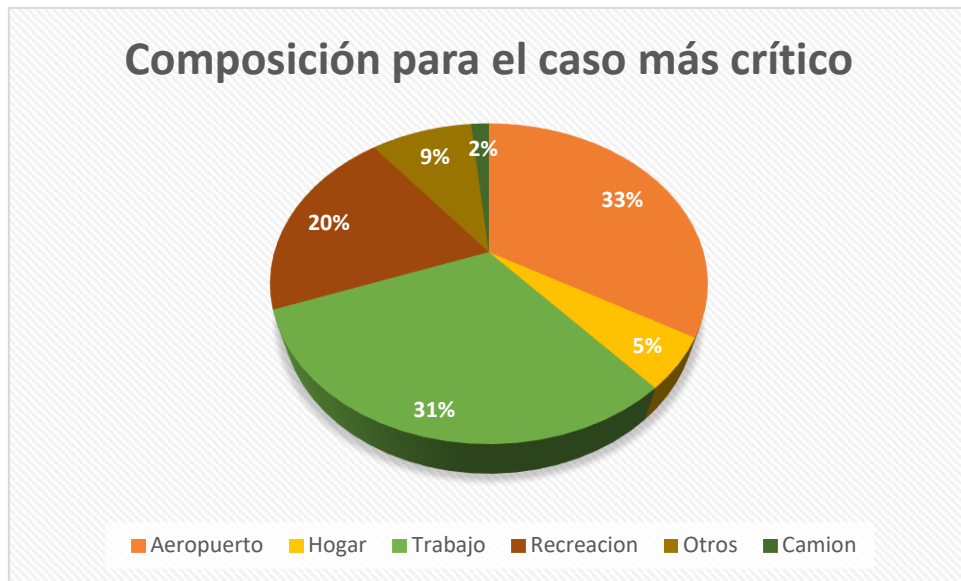


Ilustración 45. Composición de los excesos de costos sociales para el escenario crítico por motivo de viaje.
Fuente: Elaboración propia.

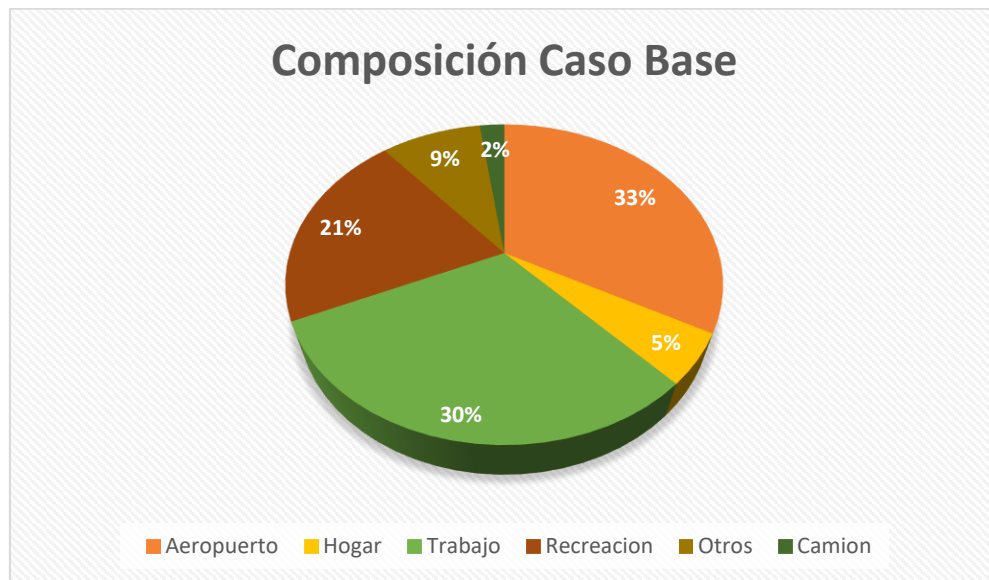


Ilustración 46. Composición de los de costos sociales para el escenario base por motivo de viaje. Fuente: Elaboración propia.

Se evidencia que la composición de los costos sociales no varía entre escenarios, pero sí la magnitud de sus valores.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Tabla 32. Valores de la composición de los excesos de costos para el escenario crítico y base. Fuente: Elaboración propia.

Tipo Incidente	Ubicación	Tiempo Obstrucción	Motivo Viaje	Costos Sociales (COP)	Composición
Doble	ASCPPostBalsos	40	Aeropuerto	57,086,970.3	33.4%
			Hogar	8,862,852.1	5.2%
			Trabajo	52,739,934.2	30.8%
			Recreación	34,256,585.2	20.0%
			Otros	15,509,991.1	9.1%
			Camión	2,715,841.7	1.6%
			Global	171,172,174.6	100.0%
Caso Ideal			Aeropuerto	47,245,686.5	32.8%
			Hogar	7,334,975.5	5.1%
			Trabajo	43,648,040.7	30.3%
			Recreación	29,610,672.0	20.6%
			Otros	12,836,207.2	8.9%
			Camión	3,149,338.3	2.2%
			Global	143,824,920.2	100.0%

Luego, se identificó la composición de los pasajeros por motivo del viaje para poder identificar los costos totales por individuo dependiendo del motivo de viaje. Para este análisis se le sumó los excesos de costos encontrados para el escenario más crítico a los costos del escenario base, encontrando así los costos totales del escenario crítico y de esta manera poder encontrar un valor individual total en vez de los excesos de costos individuales. A continuación, se presenta la Tabla 33 donde se cuantifican los valores encontrados y la Ilustración 47 donde se grafican.

Tabla 33. Costos sociales por usuario para el caso crítico y base dependiendo del motivo del viaje. Fuente: Elaboración propia.

Tipo Incidente	Ubicación	Tiempo Obstrucción	Motivo del Viaje	Costo por usuario (COP)
Doble	ASCPPostBalsos	40	Promedio global	9,019.8
			Aeropuerto	30,042.1
			Hogar	11,660.2
			Trabajo	6,454.5

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Caso Ideal		Recreacion	5,108.4
		Otros	11,660.2
		Camion	30,232.9
	Promedio Global	4,118.4	
	Aeropuerto	13,604.2	
	Hogar	5,280.2	
	Trabajo	2,922.9	
	Recreacion	2,368.4	
	Otros	5,280.2	
	Camion	16,233.7	

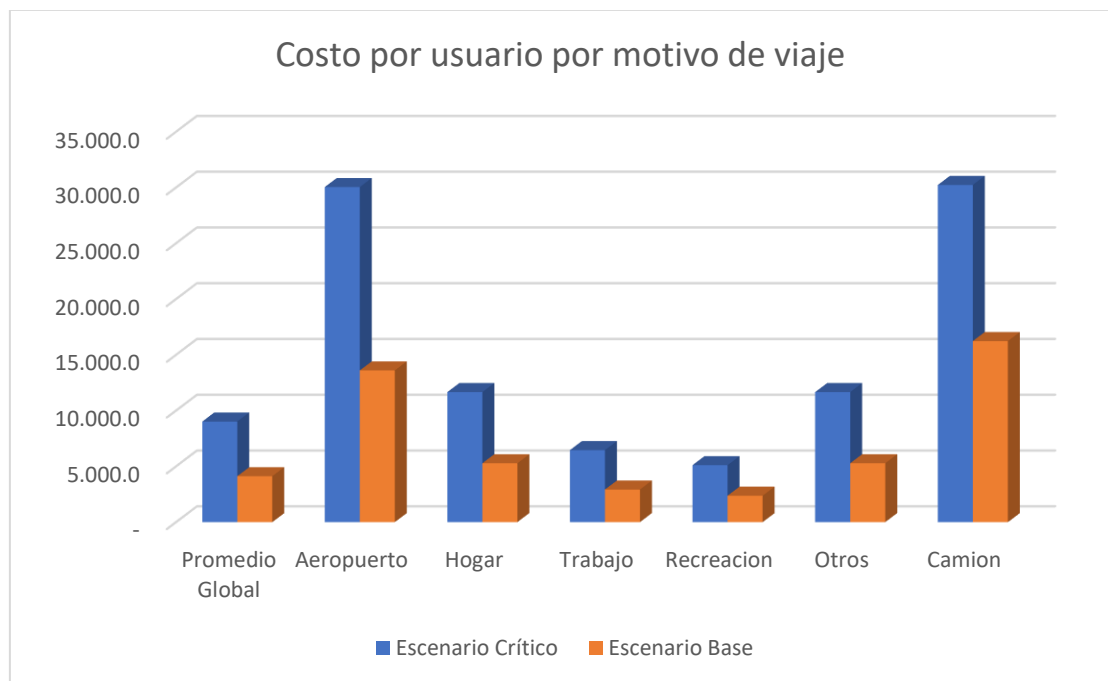


Ilustración 47. Costos sociales por usuario para el caso crítico y base dependiendo del motivo del viaje.
Fuente: Elaboración propia.

Cabe notar que el costo social por usuario con intención de ir al aeropuerto para el caso de congestión más crítico es de 30,042 COP según la aplicación de la metodología propuesta. Pero, al tener en cuenta que existe la posibilidad de que el usuario pierda su vuelo, estos costos ascenderían considerablemente.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

4.4. Estrategias de atención

De acuerdo con lo discutido en la presentación de los resultados obtenidos, se plantearon distintas estrategias para poder evitar los casos más críticos de excesos de costos. Todas las tablas y gráficas a continuación se pueden apreciar con mayor detalle en el ANEXO E. *Cálculos y análisis de costos.*

4.4.1. Por ubicación y duración

Analizando los escenarios por tipo de pendiente se presenta la Tabla 34 donde se resume el tipo de pendiente correspondiente a cada escenario y su gravedad en términos de caso más crítico, siendo 1 el caso más crítico o con mayores excesos de costos asociados.

Tabla 34. Resumen de escenarios por tipo de pendiente y gravedad. Fuente: Elaboración Propia.

Tipo Incidente (min)	Ubicación	Totales (COP)	Pendiente	Gravedad
Doble	ASCPPostBalsos	194,283,134.5	Constante	1
Doble	ASCPPreBalsos	158,538,586.3	Constante	2
Doble	DSCPreBalsos	107,863,385.4	Empinada	3
Doble	ASCPPreCola	96,731,029.3	Constante	4
Sencillo	DSCPreBalsos	69,947,018.3	Empinada	5
Sencillo	ASCPPreBalsos	65,461,608.7	Constante	6
Sencillo	ASCPPreCola	30,966,544.2	Aplanada	7
Doble	DSCPostBalsos	28,307,003.0	Empinada	8
Sencillo	ASCPPostBalsos	18,851,757.6	Aplanada	9
Sencillo	DSCPostBalsos	17,912,837.3	Empinada*	10

Para los incidentes que presentaron pendientes empinadas, se observa en la Tabla 34 que sus dos casos más críticos ubican en el tercer y quinto puesto en la escala de gravedad, ambos ubicados en el sentido descendente anterior a Balsos. El hecho de que estas gráficas se comporten como pendientes empinadas significa que el incidente tiene un periodo de 20 minutos desde el inicio del incidente donde la

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

pendiente es baja y los costos se mantienen bajos, una vez se supera ese umbral, los costos aumentan a una tasa elevada. Para poder mitigar esto propone ubicar un agente de tránsito en el CAI donde puede acceder muy fácilmente a los incidentes generados en sentido ascendente posteriores y anteriores a Balsos y también a los generados en sentido descendente anteriores a Balsos. Finalmente, para los incidentes que presentaron pendientes aplanadas se observa en la tabla anterior que sus escenarios no son críticos en comparación con el resto de los escenarios, ocupan el puesto 7 y 9 de la escala de gravedad, dándole una baja prioridad de atención, aún más teniendo en cuenta que por ser de pendiente aplanada, una vez se superan los 30 minutos de duración del incidente, los excesos de costos incrementan mucho más lentamente que inicialmente. Los esfuerzos para resolver incidentes se deben centrar más en los primeros dos comportamientos descritos.

Es de suma importancia atender los incidentes que se presenten cercanos a los retornos de preferencia de los vehículos en hora pico, como el retorno del CAI, Latino y Baltimore. Durante la simulación se evidenció la posibilidad de que un incidente en un sentido se transmita hacia el otro sentido luego de que un retorno colapse, agravando así la congestión por su interferencia en ambos flujos. Se propone entonces que para los incidentes de cualquier tipo que se generen en la proximidad de un retorno atenderlos con personal extra. De esta manera, un agente de tránsito se puede enfocar en atender el incidente y dar paso lo más rápido posible mientras que otro agente de tránsito gestiona el retorno cercano, con la misión de descongestionar el sentido opuesto a donde se generó el incidente.

Si se divide Las Palmas en tres segmentos (Anterior a la Cola del Zorro, Anterior a Balsos y Posterior a Balsos), se puede ver en la Tabla 34 que generalmente los escenarios más costosos se ubican en el sentido ascendente y también en los dos últimos tercios de los segmentos descritos para ambos sentidos. Excepto cuando los incidentes ocurren en el sentido ascendente y en solo un carril, acá ocurre un

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

fenómeno donde se presentan mayores excesos de costos en los primeros dos tercios de los segmentos descritos. En otras palabras, solamente para los incidentes de un solo carril el segmento más crítico es el comprendido entre la Cola del Zorro y los Balsos. En la Ilustración 44 se presenta la representación por colores de la criticidad de los segmentos en las Palmas para los casos más críticos, es evidente que los mayores esfuerzos de atención se deben ubicar posterior a Balsos por contener los escenarios más críticos.

4.4.2. Por ahorro de excesos de costos

Como los agentes de tránsito en la ciudad de Medellín y Envigado son un recurso limitado y se pueden generar incidentes en distintos lugares de la ciudad que requieran la atención de estos agentes, es posible no contar con la atención rápida que proporcionaría un agente de tránsito ubicado en el CAI y dependería de la disponibilidad de los agentes de tránsito de la ciudad. En este caso, se sugiere tener en cuenta la tabla completa en orden de excesos de costos para todos los escenarios simulados, encontrada en el *ANEXO E. Cálculos y análisis de costos*, para así crear una lista de prioridades para los escenarios posibles de incidentes. Se propone que los primeros 3 casos más críticos tengan una prioridad alta de atención y sea atendido por los agentes de tránsito más cercanos al sitio del incidente.

Sin embargo, se considera que aun así los agentes sean un recurso limitado, se debería disponer de agentes o relocalizar unos para que presten su servicio exclusivamente a Las Palmas. Según Secretaría de Movilidad de Itagüí (2016) un agente de tránsito tiene un salario mensual de 1,938,023 COP. Haciendo una comparación entre los excesos de costos generados por incidentes en Las Palmas y los salarios a pagar a estos tránsitos se encontró que, con una reducción de la mitad del tiempo de obstrucción del caso más crítico simulado, se podría ahorrar aproximadamente 132,630,000 COP en excesos de costos por la congestión, valor

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

suficiente para costear el salario de dos agentes de tránsito permanentes por 2 años y 9 meses, la tabla consolidada de posibles ahorros en excesos de costos por disminución del tiempo de obstrucción se presenta más adelante en la Tabla 35.

A continuación, se toman los excesos de costos para todas ubicaciones y tipos de incidentes con duración de 40 minutos y se deduce la cantidad de ahorro potencial a partir de reducciones de 10 y 20 minutos en el tiempo de obstrucción de estos incidentes, representado en la Tabla 35. Es necesario tener en cuenta que para poder hacer este tipo de reducciones se necesitan grandes esfuerzos y depende altamente de la naturaleza del incidente que puede variar considerablemente, desde un vehículo varado hasta un choque múltiple con muertos, por esta razón solamente se evaluaron reducciones de 10 y 20 minutos.

Tabla 35. Escenarios de incidente con el mayor potencial de ahorro de excesos de costos por disminución del tiempo de obstrucción. Fuente: Elaboración propia.

Tipo Incidente	Ubicación	Disminución de tiempo de obstrucción (min)	Ahorro en excesos de costos (COP)
Doble	ASCPPostBalsos	20	132,631,581.46
Doble	ASCPreBalsos	20	101,142,721.31
Doble	DSCPreBalsos	20	86,435,113.26
Doble	ASCPPostBalsos	10	70,998,856.20
Sencillo	DSCPreBalsos	20	55,058,338.35
Doble	ASCPreBalsos	10	50,073,874.21
Doble	ASCPreCola	20	47,646,648.92
Sencillo	ASCPreBalsos	20	46,809,204.41
Doble	DSCPreBalsos	10	39,619,258.80
Sencillo	ASCPreBalsos	10	26,300,090.85
Sencillo	DSCPreBalsos	10	23,941,145.55
Doble	DSCPostBalsos	20	21,658,694.51
Doble	ASCPreCola	10	17,038,443.49
Sencillo	ASCPreCola	20	16,450,439.10
Sencillo	ASCPPostBalsos	20	10,469,451.32
Sencillo	DSCPostBalsos	20	8,301,974.17

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Sencillo	DSCPostBalsos	10	6,415,865.18
Doble	DSCPostBalsos	10	5,535,880.20
Sencillo	ASCPreCola	10	3,046,193.18
Sencillo	ASCPostBalsos	10	1,434,810.41

Es de especial interés notar en la Tabla 35 que los primeros 4 escenarios de incidentes con mayor potencial de ahorro de excesos de costos corresponden a los 3 casos más críticos evaluados en el inciso 4.4.1 *Por ubicación y duración*; el primer y cuarto puesto de la Tabla 35 corresponde a una disminución de 20 y 10 minutos respectivamente en el tiempo de obstrucción del caso más crítico del críticos evaluados en el inciso 4.4.1 *Por ubicación y duración*, convirtiéndolo en el caso más crítico absoluto.

De los 10 escenarios con mayores potenciales ahorros, 9 de ellos se ubican en los dos últimos tercios de los segmentos descritos anteriormente (Anterior a la Cola del Zorro, Anterior a Balsos y Posterior a Balsos). Para los primeros 10 escenarios establecidos se encontró que por cada minuto de disminución en el tiempo de obstrucción partiendo de un incidente de 40 minutos, se ahorrarían en promedio 4,218,538.8 COP, lo suficiente para costear el salario de un agente de tránsito por aproximadamente 2 meses.

La alcaldía de Medellín ya está adelantando procesos para mejorar las condiciones de tráfico, según Caracol Radio (2018), se implementaron 200 agentes de tránsito adicionales con el objetivo de regular la movilidad en las vías de alta congestión en las horas pico para agilizar el flujo vehicular y también la atención de incidentes de tránsito.

El primer grupo de 100 agentes que comenzó a ejercer labores en agosto ya muestra resultados positivos en las zonas donde se enfocaron. En primer lugar, el tiempo de respuesta de atención de incidentes mejoró en un 6%, al lograr una reducción promedio de 54 segundos, en siete corredores viales

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

priorizados” además se “encontrado una mejoría en los tiempos de viaje de avenidas como: la Regional (18 %), Las Vegas (14 %), El Poblado (11 %) y Las Palmas (2 %)” (Caracol Radio, 2018). Además, en Medellín en el 2016 el tiempo de respuesta de los agentes de tránsito para la atención de incidentes era de 41 minutos, en el 2017 bajó a 35 minutos y para el 2018 disminuyó a 17 minutos (Areiza, 2019).

4.4.3. Optimización del croquis

Otra estrategia de atención de incidentes para mitigar el impacto de estos es disminuyendo el tiempo de atención de los agentes de tránsito sin necesidad de tener más personal, sino con procesos de optimización del proceso de levantamiento del incidente. En vez de esperar a que llegue un agente de tránsito y haga el levantamiento y se resuelva el incidente que en promedio este tiempo es de alrededor de 50 minutos y 16 segundos (Centro de Control de Tránsito de Medellín, 2018), disponer de cámaras en las zonas críticas identificadas anteriormente de tal manera que dependiendo de la gravedad del incidente, los implicados en el incidente puedan mover sus vehículos para permitir el flujo lo más rápido posible y luego determinar la culpabilidad del incidente usando lo capturado por estas cámaras. Actualmente se tienen únicamente dos cámaras de fotodetección en Las Palmas, una de ellas se encuentra dentro de la zona analizada en el proyecto, a la altura de Chuscalito. Con una proliferación de cámaras CCTV en la longitud de Las Palmas, con tecnología de Detección Automática de Incidentes (DAI), se podrían reducir los tiempos de respuesta y así el tiempo de obstrucción.

Otra estrategia es la implementación de drones controlados remotamente que hagan el levantamiento del incidente mientras que el agente de tránsito llega al lugar de los hechos, de esta manera disminuir el tiempo de atención de los incidentes. Según LocutorCO (2018), en Bogotá ya se están implementando los drones para el

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

levantamiento de los croquis. Esta tecnología ya se encuentra en el país y se podría implementar en Las Palmas, y de esta manera, dependiendo de la gravedad del incidente, se lograría acortar los tiempos de obstrucción y también los tiempos de atención de éstos sin tener que esperar a que llegue el agente de tránsito al lugar de los hechos.

4.4.1. Evitar los incidentes

Es claro que los costos evaluados son basados exclusivamente en los costos asociados a la congestión. Pero, existen otros costos asociados a un incidente, como los costos de daño a la propiedad que incluye daños a vehículos y a la malla vial, y costos humanos que incluye pérdida de la productividad, de la calidad de vida y el costo de los médicos (Jiménez, 2015). Por esta razón, es claro que el costo de un incidente es mayor al costo calculado en este trabajo, y no se evaluaron beneficios adicionales que se obtienen al tener una atención más oportuna por los servicios de emergencia. En la Tabla 36 se observa como estos costos en tan solo 9 meses pueden llegar a ser significativos. De esta forma, se concluye que, sin importar el impacto del incidente en la vía, es de suma importancia que los servicios de emergencia lo atiendan lo más rápido posible, y la información de este estudio no deberá ser utilizada en ningún momento para justificar tiempos mayores de atención o respuesta.

Tabla 36. Costo de la accidentalidad. Enero a septiembre de 2016. Fuente: (SIMM, 2016)

Tipo de accidente	Cantidad de incidentes		Costo accidentalidad [Millones de pesos]	
	Vía Las Palmas	Vía Túnel de Occidente	Vía Las Palmas	Vía Túnel de Occidente
Sólo daños	252	15	2.016	120
Con heridos	170	55	4.450	1.430
Con muertos	5	1	4.000	800
Total	427	71	10.436	2.350

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Se considera que siempre será mejor que el incidente no ocurra en la vía. Se estima que el 57% de las curvas entre el Country Club y el Retorno 8 de las Palmas, tienen una velocidad de diseño correspondiente a su geometría menor a 50 km/h (SIMM, 2016). Adicionalmente, comparando velocidades entre dos cámaras en un trayecto de 4 km, se observó que el 33% de los vehículos en sentido descendente transitan a más de 60 km/h y este número corresponde al 17% en sentido ascendente, se puede identificar uno de los motivos por los cuales esta vía tiene índices tan altos de accidentalidad (SIMM, 2016). Lo antedicho se agrava al considerar que al aumentar la velocidad media de un vehículo en 1% trae consigo un incremento de un 3% en incidentes con heridos y un 4% en incidentes mortales (OMS, 2018).

Existe una responsabilidad compartida entre quienes diseñan, construyen, administran y usan las vías y los vehículos, junto con quienes brindan atención luego de ocurrido el siniestro de tránsito, para evitar que éste tenga resultado de muerte o lesiones graves. En el informe Cero Muertes y Lesiones de Gravedad por Incidentes de Tránsito: Liderar un cambio (ITF, 2017) , se considera un modelo de calificación de vías por estrellas que comprende más de 60 atributos viales, tales como elementos básicos del diseño del sistema, con este se consigue afirmar que el riesgo de muerte o lesiones graves por kilómetro recorrido de una vía con calificación de cinco estrellas es de aproximadamente el 10% del riesgo que un usuario afronta en una vía con calificación de una estrella. En la Ilustración 48 se presenta la reducción de costos por incidentes según la calificación de la vía en términos de seguridad vial.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.



Ilustración 48. Reducción de costos por incidentes según mayor clasificación de seguridad vial. Fuente: (ITF, 2017)

Según la Secretaría de Movilidad de Medellín (2019):

Durante el primer *Congreso de Movilidad Futura*, realizado en Medellín, el alcalde Federico Gutiérrez Zuluaga firmó el decreto con el cual la capital antioqueña adopta un enfoque de *Visión Cero* como política para la gestión de la seguridad vial, el cual focaliza acciones hacia la disminución de la mortalidad. La meta es reducir en un 25 % el número de lesionados y fallecidos por incidentes en el período 2019-2030. La *Visión Cero*, que nació en Suecia a mediados de la década del noventa, tiene como premisa que no deben existir víctimas fatales ni heridos graves de siniestros viales, dado que la pérdida de una vida es moralmente inaceptable y el sistema vial debe proteger permanentemente a los individuos de los errores humanos propios de su condición.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Una estrategia inicial para apuntar a la reducción de incidentes en palmas sería la implementación de paneles informativos. Actualmente, en las principales vías de Medellín se “cuenta con 22 paneles informativos, pantallas de mensajes variables que publican información en tiempo real sobre el estado de las vías de acuerdo con el tráfico vehicular” (Secretaría de Movilidad de Medellín, s/f), y también la información que se publica desde el Centro de Control de Tránsito “permite generar alertas para los conductores indicándoles rutas alternas con el fin de optimizar sus desplazamientos, además, informa sobre los peligros en la vía disminuyendo los riesgos de incidentes”. Como beneficio adicional se lograría que los usuarios estén enterados de las novedades y del tiempo aproximado de normalización del flujo, disminuyendo la percepción del taco y el estrés de los usuarios.

4.4.2. Consolidación de estrategias

Teniendo en cuenta el análisis hecho en los títulos anteriores y los antecedentes expuestos al principio del estudio, se consolidaron las estrategias y se presentan a continuación:

Durante el desarrollo de la simulación se evidenció las dinámicas vehiculares debidas a incidentes en diferentes ubicaciones, se encontró que los incidentes cercanos a los retornos más concurridos presentaban un comportamiento de interés. Se trata de que eventualmente, las filas alcanzaban los retornos y bloqueaban ambos carriles del sentido opuesto, expandiendo la zona de afectación de estos incidentes a ambos sentidos, convirtiéndolos en incidentes de especial interés y a los cuales se les asigna prioridad en la resolución de la obstrucción. Para esto se propone **disponer de agentes de tránsito ubicados en los retornos** más concurridos como Baltimore y Latino, y los próximos a los segmentos de Las Palmas con mayores flujos como el retorno del CAI.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

En base a la Tabla 34, y con la suposición de que los agentes de tránsito son un recurso limitado de los municipios, se propone **establecer los casos más críticos como máxima prioridad de los agentes cercanos**. Estos serían los primeros 3 escenarios presentados en la Tabla 34, que sus excesos de costos superan los 100 millones de COP, que en comparación con los costos bases de movilización con flujo normal en Las Palmas, estos tres casos críticos representan incrementos de más del 150% del costo base de movilización.

Aun así los agentes sean un recurso limitado, se propuso **ubicar agentes de tránsito en sitios estratégicos en la longitud de Las Palmas**, pero según lo expuesto por Castañeda & Villegas (2017), reduciendo el número de estaciones usadas para despachos, pero incrementando la flota de atención, se puede proveer un nivel aceptable de servicio para el sistema. Por este motivo se considera usar solo una base de despacho. De ahí, resulta otra estrategia deducida que consiste en ubicar uno o preferiblemente varios **agentes de tránsito permanentemente en el retorno del CAI**. Se considera que esta estrategia sería altamente efectiva porque la ubicación del retorno del CAI se cree estratégica en la atención de incidentes por diferentes criterios para la definición de casos críticos: Se visualizó en la Ilustración 44 que el retorno del CAI se encuentra próximo a los 3 segmentos con los escenarios de mayores excesos de costos asociados (tramo anterior y posterior a Balsos en sentido ascendente y tramo anterior a balsos en sentido descendente). Adicionalmente, se encontró que, para un incidente en sentido descendente anterior a Balsos, la gráfica de excesos de costos en relación con la duración de obstrucción por el incidente presenta una pendiente empinada, lo que significa que este tipo de eventos es de especial interés desobstruirlos en 20 minutos o menos, antes de que la tasa de incremento de excesos de costos incremente drásticamente. Con uno o varios agentes de tránsito permanentes en el CAI se lograría una disminución del tiempo de obstrucción para el escenario antedicho y, aunque no se pueda garantizar la desobstrucción en menos de 20 minutos.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

minutos, es posible reducir este tiempo unos cuantos minutos. Se puede afirmar que por cada minuto de disminución en el tiempo de obstrucción partiendo de un incidente de 40 minutos, se ahorrarían en promedio 4,218,538.8 COP, lo suficiente para costear el salario de un agente de tránsito por aproximadamente 2 meses. Finalmente, los 3 anteriores segmentos mencionados (tramo anterior y posterior a Balsos en sentido ascendente y tramo anterior a balsos en sentido descendente) presentan los primeros 3 puestos en la Tabla 35 de potenciales ahorros en excesos de costos por disminución del tiempo de obstrucción partiendo del un incidente con tiempo de obstrucción de 40 minutos, evidenciado que son los segmentos donde se debe tener más fácil acceso para lograr estas disminuciones.

Otra forma de disminuir los tiempos de obstrucción es los tiempos de intervención de los agentes de tránsito, esto se puede conseguir con la **optimización de los croquis** mediante la implementación de apoyos tecnológicos. La **proliferación de cámaras CCTV** en la longitud de Las Palmas, con tecnología DAI, apunta a una detección más rápida de los incidentes y así, reducir los tiempos de respuesta y por consiguiente los tiempos de obstrucción. También, se propone la **implementación de drones** y personal capacitado, que aproveche el largo alcance de estos para hacer el levantamiento de incidentes mientras que el agente de tránsito llega al lugar de los hechos, agilizando el proceso una vez se encuentre allí, y así disminuyendo el tiempo de atención de los incidentes. Se ha evidenciado que para incidentes vecinos al retorno del CAI, los policías del comando proceden a atender los implicados en el hecho mientras que las autoridades competentes llegan al lugar de los hechos, una posible estrategia derivada de esto es la **capacitación de policías** para ir adelantando el croquis mientras se espera a los agentes, de esta manera disminuyendo el tiempo de atención de los incidentes.

Finalmente, se propone **evitar los incidentes**, existen otros costos asociados a un incidente, como los costos de daño a la propiedad y costos humanos que incluye

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

pérdida de la productividad, de la calidad de vida y el costo de los médicos. Se considera que siempre será mejor que el incidente no ocurra en la vía, para esto se necesitan vías más seguras para los usuarios. Una estrategia es la **implementación de paneles informativos**, que trae beneficios tales como: proveer información en tiempo real con respecto a novedades y condiciones climáticas, reducción de la incidentalidad e informes de campañas de seguridad vial. Para concluir, se propone la estrategia de la construcción de vías con el enfoque de **visión cero**, donde se tiene como premisa que no deben existir víctimas fatales ni heridos graves de siniestros viales. Para esto es necesario la construcción efectiva de corredores viales con lineamientos enfocados en la seguridad para conseguir caminos de cinco estrellas según la clasificación de ITF (2017) y reducir significativamente los riesgos de incidentalidad.

5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

- Los excesos de costos sociales asociados al costo de oportunidad son los que conforman la mayor parte de los excesos de costos totales, eclipsando los excesos de costos de operación y de contaminación, esto se debe a una combinación entre los elevados valores del costo subjetivo del tiempo en comparación con los demás costos y además, su multiplicación por la ocupación de los vehículos.
- El escenario que más veces se presentó en los primeros puestos de todos los análisis de escenarios críticos fue el incidente de dos carriles posterior a Balsos. Para una disminución de 20 minutos en el tiempo de obstrucción, el potencial ahorro en excesos de costos es 13 veces mayor para incidentes de dos carriles que para uno, y para disminuciones de 10 minutos en el tiempo de obstrucción es 50 veces mayor.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- El estudio se enfoca en simular incidentes que causan bloqueos u obstrucciones en el flujo, pero existe la posibilidad de que los bloqueos generados no sean resultados de un incidente sino también del desprendimiento de material de los taludes tales como árboles, rocas o tierra; también por fallas de la infraestructura vial como el pavimento, postes o señalización, todos estos casos deben tratarse con los mismos criterios expuestos en este estudio.
- Aunque el trabajo funciona bien como escenario base, es claro que para el futuro hay un factor que afectará de forma significativa este escenario y es la apertura del Túnel de Oriente el cual está planeado para finales de julio de 2019 (Rámirez, 2019). En la Ilustración 49 se observa el trazado que se tiene planeado.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

A MOVILIDAD
TRAZADOS QUE AGILIZARÍAN EL ORIENTE



Fuente: Masora y CCOA. Infografía: EL COLOMBIANO © 2017. PA-JT (N4)

Ilustración 49. Trazado del Túnel de Oriente. Fuente: (V. A. Álvarez, 2017)

Con la apertura de este túnel se cree que disminuirá el tráfico por la avenida Las Palmas. Sin embargo, es probable que esta disminución sea momentánea, ya que está sujeta a un fenómeno conocido como demanda inducida, en la cual la disminución del tráfico hace que la vía sea más atractiva, resultando en un aumento en el tráfico. Lo cierto es que esto afectará los flujos. De todas formas, teniendo en cuenta que se encontró que los costos asociados a ir al aeropuerto representan la mayoría de los costos sociales derivados por transportarse por la vía Las Palmas y que uno de los propósitos del Túnel de Oriente es conectar de forma más rápida al Valle de

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Aburrá con el Aeropuerto José María Córdova, se concluye que los costos de transportarse por esta vía disminuirán significativamente.

- Se considera que, para hacer un análisis más realístico, se debieron tomar datos estadísticamente significativos. Si bien se escogieron días típicos para hacer los aforos de tránsito, la realidad es que para que tengan más validez, se debe tomar una muestra de datos más grande. Por el alcance del proyecto esto se hace imposible (se dedicaron más de 104 horas a la recolección de datos). En el futuro, se estima que la información recolectada por las cámaras de la Secretaría de Movilidad de Medellín será de gran importancia y podrá ser utilizada para próximos trabajos, ya que permite tener información estadísticamente significativa. Adicionalmente, la información proporcionada por estas cámaras contiene entre otras cosas, la velocidad instantánea de los vehículos, la cual sirve para hacer una calibración más exacta del modelo base. Un caso en específico en el cual limitar el tiempo de aforos pudo sesgar la recolección de datos es que se asumió que los días en que se tiene más demora en la vía también se tiene más flujo vehicular, pero, no se tuvo en cuenta que estas demoras extras podían ser causadas porque en ese día en particular el flujo vehicular estaba compuesto principalmente por tipos de vehículo que transitan a una menor velocidad. Ese fue el caso de los aforos realizados los domingos, ya que, en la mañana, la mayor parte del flujo vehicular está compuesto por bicicletas, y por esto en Google Maps aparecen tiempos promedio de viaje hasta de 43 minutos este día.
- Por otro lado, si bien este modelo se intenta acercar a la realidad, sigue siendo un modelo, y por este motivo, se debe entender que los resultados no necesariamente corresponden a la realidad. A continuación, se enlistan elementos del modelo que se consideran que podrían incurrir en errores:

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- No se encontró ninguna metodología relevante para calibrar los distintos incidentes modelados. Por lo tanto, aunque el modelo base esté completamente calibrado, la modelación del incidente puede que no lo esté. Es probable que en trabajos futuros que tengan información de primera mano en el momento que ocurra un incidente, se calibren estos modelos y así observar que tanto se asemejan a esta situación. Algunos de los comportamientos que se considera que podrían ser distintos a la realidad son:
 - En las congestiones en sentido ascendente por la vía Las Palmas es común observar vehículos que se varan al sobre esforzar el embrague por tener velocidades tan bajas en un trayecto prolongado y con un gradiente positivo. Esto genera obstrucciones adicionales.
 - En la simulación las motos en ocasiones se quedan atascadas en la congestión, pero en la realidad no se observa este comportamiento, lo que puede generar que los costos por congestión por parte de las motos sean menores a los encontrados.
 - El tráfico es influenciado por numerosas variables de las cuales algunas son dependientes del comportamiento humano, haciendo que este (el tráfico) sea muy impredecible y dinámico, la ayuda de herramientas modernas como Waze y Google Maps ayudan a los conductores a tomar rutas óptimas o incluso a eliminar trayectos gracias a su sistema de información masivo, haciendo posible que conductores reaccionen a los incidentes de manera que el software no pueda simular.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

Aunque no se considera influyente que el usuario cambie su trayecto por las opciones limitadas que tiene de hacerlo, si se considera que se puede reducir flujo vehicular por usuarios que deciden no viajar para evitar la congestión.

- No se modelaron incidentes secundarios, lo cual según Belt & Bruner PC, (2017), ocurre en un 20% de todos los incidentes de tráfico.
- Al tener periodos de simulación efectiva de 2 horas y 30 minutos, en los casos que se tenían incidentes que no son tan críticos, los resultados finales eran aún menos críticos que si los periodos de simulación efectiva fueran menores. De todas formas, el periodo de simulación efectiva no se puede cambiar puesto que esto haría que cualquier tipo de comparación entre incidentes sea sesgada, y este es el periodo necesario para que el flujo se normalice luego de los incidentes más críticos simulados.
- La categoría de *Carros, vans y busetas* no fue apropiada a la hora de tomar los aforos. Esto se debe a que el factor más relevante en los costos de un trayecto es el costo de oportunidad. Estos costos tienen una relación directa al número de personas por vehículo, y un automóvil en general tiene distinta ocupación si es particular o de servicio público o si es una van o una buseta pequeña. Por esta razón, se recomienda que, en caso de realizar un trabajo similar, se agrupen las categorías vehiculares dependiendo de la ocupación que se estima que pueda tener y del motivo aparente del viaje. Para el caso de esta simulación, se asumió el caso menos crítico en el cual todos los vehículos de la categoría *Carros, vans y busetas* tienen una ocupación

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

promedio de 1.53 pasajeros, que equivale a la ocupación promedio de un automóvil particular.

- Durante todas las simulaciones, no se cambió la semilla de la simulación, por esta razón, para tener resultados más confiables, se recomienda aumentar el número de simulaciones hasta tener resultados significativamente relevantes. Sin embargo, en este Trabajo de Grado esto no fue posible dado que no se contaba con el nivel computacional ni con las licencias suficientes para simular 1200 horas adicionales de incidentes.
- Por otro lado, en algunos casos, se ha observado el comportamiento de la vía Las Palmas siendo afectado por la glorieta de Indiana, obteniendo colas hasta después del retorno de la Candelaria. Sin embargo, este comportamiento no fue modelado porque no se consideró representativo en un día típico.
- Los costos asociados al costo de oportunidad no están discriminados dependiendo del sentido de la vía. Esto es importante ya que, por ejemplo, es distinto el costo de una persona que va hacia el aeropuerto, al de una persona que regresa del aeropuerto.
- Aunque este trabajo tiene la intención principal de simular incidentes, se considera que también aplica para todo tipo de incidente en la vía que afecte uno o dos carriles en los lugares simulados. Una de las causas más comunes para este tipo de incidentes en las Palmas son los deslizamientos de tierra, el más reciente fue el 1 de Junio de 2019 (Botero, 2019).
- Se considera que, al basarse en cálculos de costos ambientales de hace 20 años, estos resultados hoy en día pueden tener una mayor valoración. Cómo

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

trabajo futuro, se recomienda validar esta información, y así se podría definir si en realidad la participación del costo de oportunidad equivale a aproximadamente el 90%.

- Una de las aplicaciones de este Trabajo de Grado sería la creación de un software similar a Waze y Google Maps, pero en el cual se evalúe el costo de un viaje dependiendo de la ruta. No solamente el tiempo o el valor de los peajes. De esta forma, los usuarios tomarían decisiones económicamente más eficientes.
- Se considera que las entidades de tránsito deberían tener un indicador adicional a los dos comúnmente presentados. Deberían medir no solamente el tiempo en que se demora el tránsito en llegar al incidente y el tiempo en que se demora en resolver totalmente el incidente, sino que también el tiempo en que se demoran en habilitar el flujo. De esta forma, se enfocarían en buscar formas para hacer este proceso más eficiente.
- Por último, se concluye que, si bien las estrategias propuestas tienen en cuenta los casos más críticos simulados, estos casos no necesariamente serán objetivamente los más críticos en la realidad. Esto se da por dos razones principales:
 - Se tomaron solamente 4 posibles puntos de incidente de los infinitos puntos que se tienen en la vía.
 - Aunque el flujo ascendente tiene flujos mayores, y por ende tiene casos más críticos, es más probable que los incidentes se den en la calzada descendente puesto que se tienen velocidades mayores por el gradiente negativo.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

6. ANEXOS

ANEXO A. Aforos y Análisis de los Aforos

ANEXO B. Calibración del Modelo

ANEXO C. Simulación

ANEXO D. Resultados de red

ANEXO E. Cálculos y análisis de costos

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

REFERENCIAS

- Alcalá Ramos, M. A. (2016). *Micro Simulación Del Tráfico De La Intersección De Las Avenidas Bolívar, Córdoba Y Calle Andalucía Empleando El Software Vissim 6*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Álvarez, V. A. (2016). Crecimiento urbano en Oriente urge políticas públicas para evitar colpaso. Recuperado el 15 de septiembre de 2018, de <http://www.elcolombiano.com/antioquia/crecimiento-urbano-del-oriente-antioqueno-requiere-politicas-publicas-para-no-colapsar-LG4769814>
- Álvarez, V. A. (2017). Túnel de Oriente, sin vías anexas, un “elefante blanco”. Recuperado de <https://www.elcolombiano.com/antioquia/tunel-de-oriente-sin-vias-anexas-un-elefante-blanco-BB7506377>
- AMVA. (s/f). Calidad del Aire/ Condiciones Especiales del Valle de Aburrá. Recuperado el 15 de marzo de 2018, de http://www.metropol.gov.co/CalidadAire/Paginas/wz_condiciones_especiales.aspx
- ANI. (2016). “ App Accesos Norte De Bogota - Accenorte ” Proponente Promesa De Sociedad Futura App Accesos Norte De Bogota S . a .
- Arboleda, J. D. (2012). Pico y placa, una medida angular en Colombia. Recuperado de <https://www.sura.com/blogs/autos/picoy-placa.aspx>
- Areiza, D. (2019). En Medellín redujeron los tiempos de respuesta para atender accidentes. Recuperado el 25 de mayo de 2019, de <https://telemedellin.tv/medellin-tiempos-de-respuesta-accidentes/303012/>
- AutoInsurance Center. (s/f). Emergency Response Times Across the U.S. Recuperado el 18 de septiembre de 2018, de <https://www.autoinsurancecenter.com/emergency-response-times.htm>
- Belt & Bruner PC. (2017). HOW TO AVOID A SECONDARY CAR CRASH. Recuperado el 15 de septiembre de 2018, de <https://www.alabamainjurylawyer.com/avoid-secondary-car-crash/>
- Benincore, M. (2018). ¿Por qué hay tantos accidentes en la vía Las Palmas? Recuperado el 15 de septiembre de 2018, de <http://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/accidentes-en-la-via-las-palmas-de-medellin-ND8555935>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Botero, C. (2019). Derrumbes afectan algunas vías de Antioquia durante Plan Éxodo. Recuperado de <https://telemedellin.tv/derrumbes-vias-de-antioquia-plan-exodo/334279/>
- Bustamante, A. F. (2016). Accidente causó congestión de más de dos horas en Las Palmas. *El Palpitar*. Recuperado de <http://www.elpalpitar.com/movilidad/2016/02/accidente-causo-congestion-de-mas-de-dos-horas-en-las-palmas/>
- CAMLYTICS. (2018). Camera Analytics Software for Home & Business. Recuperado el 8 de septiembre de 2018, de <https://camlytics.com/>
- Caracol Radio. (2018). Medellín incorpora otros 200 agentes de tránsito a mejorar la movilidad. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de https://caracol.com.co/emisora/2018/09/14/medellin/1536936446_311893.html
- Carvajal Restrepo, E. (2018). Todo lo que debe saber del pico y placa ambiental en Medellín. Recuperado el 9 de noviembre de 2018, de <http://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/pico-y-placa-ambientalen-medellin-BE8237175>
- Carvalho, M., & Luna, L. (2002). Advanced Topics in System Dynamics. Recuperado el 8 de septiembre de 2018, de https://www.albany.edu/cpr/sdgroup/pad824/Discrete_and_Continuous_Simulation.ppt
- Castañeda, C. P., & Villegas, J. G. (2017). Analyzing the response to traffic accidents in Medellín, Colombia, with facility location models. *IATSS Research*, 41(1), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2016.09.002>
- Centro de Control de Tránsito de Medellín. (2018). *Análisis Accidentalidad Av. Las Palmas*. Medellín.
- Chang, G. L., & Xiang, H. (2003). The relationship between congestion levels and accidents. *State Highway Administration*, (July). Recuperado de http://roads.maryland.gov/OPR_Research/MD-03-SP308B46-Congestion-Vs-Accidents-Report.pdf
- Consortio Sym. (2013). Informe Final Estudio De Movilización De Pasajeros En Rutas Urbanas De La Ciudad , Mediante Aforos. *Secretaría de Movilidad*, 139. Recuperado de [https://www.medellin.gov.co/movilidad/jdownloads/Cifras_y_Estudios/Estudios/Estudio de movilizacion de pasajeros en rutas urbanas de la ciudad mediante aforos de](https://www.medellin.gov.co/movilidad/jdownloads/Cifras_y_Estudios/Estudios/Estudio_de_movilizacion_de_pasajeros_en_rutas_urbanas_de_la_ciudad_mediante_aforos_de)

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

registradoras/estudio_movilizacion_pasajeros_rutas_urbanas_aforos_registradoras.pdf

Cookson, G., & Pishue, B. (2017). INRIX Global Traffic Scorecard. *Inrix Global Traffic Scorecard*, (February), 44. Recuperado de <https://media.bizj.us/view/img/10360454/inrix2016trafficscorecarden.pdf>

Daza, E. (2017). Entrevista Personal.

Diaz, C. (2018). Hacia \$10.000 por galón de gasolina. Recuperado el 17 de mayo de 2019, de <https://www.dinero.com/opinion/columnistas/articulo/hacia-10-mil-pesos-por-galon-de-gasolina-por-camilo-diaz/264254>

Dinero. (2014). El costo anual del trancón en Colombia sería de \$3,9 billones. Recuperado de <https://www.dinero.com/empresas/articulo/costo-trancones-colombia/203215>

Dinero en el Tiempo. (2019). Valor actual del peso colombiano de 2009. Recuperado el 16 de mayo de 2019, de <https://www.dineroeneltiempo.com/peso-colombiano/de-2009-a-valor-presente>

Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). Traffic Analysis Toolbox Volume III : Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. *Rep. No. FHWA-HRT-04-040, U.S. DOT, Federal Highway Administration, Washington, D.C, III*(July), 146.

FHA. (s/f-a). Calibration of Microsimulation Models. Recuperado el 9 de noviembre de 2018, de https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysisistools/tat_vol3/sect5.htm

FHA. (s/f-b). Calibration of Microsimulation Models. Recuperado de https://ops.fhwa.dot.gov/trafficanalysisistools/tat_vol3/sect5.htm

Giraldo Trejos, M. L. (2012). Consultoria Para La Actualización De Costos De Mantenimiento De Vehículos De Transporte Público Colectivo Y Rendimiento De Combustible; Insumo Para El Cálculo De La Tarifa Año 2012. Recuperado de http://www.medellin.gov.co/transito/archivos/tecnica/laboratorio-movilidad/estudios-movilidad/otros_estudios/costos_mantenimiento_rendimiento_combustible.pdf

Gobernación de Antioquia. (2009). Pavimentación de la Vía Granada - San Carlos.

Gómez, J. M. (2019). Tránsito y Transporte UEIA.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

González, M. (2017). Entrevista Personal.

Google. (2018). Google Maps. Recuperado el 19 de septiembre de 2018, de <https://www.google.com/maps/@6.1929629,-75.5606512,13.5z>

Google. (2019). Google Maps.

H13N. (2018). Monumental congestión en vía Las Palmas por Choque múltiple. Colombia. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=ARiD60LhZTo>

Herrera, V. (2018). ¿Por qué son tan aparatosos los accidentes en Las Palmas? Recuperado el 8 de noviembre de 2018, de <http://www.elcolombiano.com/antioquia/accidentes-en-la-via-de-las-palmas-FF9513878>

Hunter, M. (2017). Trapped in traffic after a crash: What's the protocol when highways are shut down? Recuperado el 18 de septiembre de 2018, de https://www.nola.com/traffic/index.ssf/2017/04/trapped_by_traffic_whats_the_p.html

ITF. (2017). Cero Muertes y Lesiones de Gravedad por Accidentes de Tránsito: Liderar un cambio de paradigma hacia un Sistema Seguro. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1787/9789282108253-7-es>

Jiménez, A. (2015). Metodología para el análisis detallado de accidentes de tránsito en países en desarrollo: adaptación y aplicación al caso de los motociclistas de Bogotá. Recuperado de https://biblioteca.uniandes.edu.co/visor_de_tesis/web/?SessionID=L1Rlc2lzXzlwMTUxMDEvNTU2NS5wZGY%3D

Kineo Ingeniería. (s/f). Sistemas de Identificación y control de vehículos. Recuperado el 8 de septiembre de 2018, de <https://www.interempresas.net/Robotica/FeriaVirtual/Producto-Aforo-y-clasificacion-vehicular-71058.html>

LocutorCO. (2018). Drones para levantar croquis. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de <http://blogs.eltiempo.com/podcast-elsiglo21eshoy/2018/02/28/drones-levantar-croquis/>

Marín, E. (2017). Entrevista Personal.

Márquez-Díaz, L. G. (2010). Metodología para valorar los costos externos de la accidentalidad en proyectos de transporte. *Ingeniería y Universidad*, 14(1),

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

161–176.

- Mercadolibre. (s/f). Aceite galón 20w50. Recuperado el 20 de mayo de 2019, de https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-470530633-aceite-20w50-galon-_JM?quantity=1
- Montoya, M. (2018). Valle de Aburrá, la región con más accidentalidad del país. *El Tiempo*. Recuperado de <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/valle-de-aburra-la-region-con-mas-accidentalidad-del-pais-201314>
- Muñoz Puentes, P. E. (2014). *Metodología para evaluar los sobre costos por congestión vehicular en la malla vial arterial principal de la ciudad de Bogotá D.C.* Universidad Nacional de Colombia.
- OMS. (2018). Accidentes de tránsito. Recuperado de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>
- Osorio, M. (2018). Valle de Aburrá, la región con más accidentalidad del país. Recuperado el 8 de septiembre de 2018, de <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/valle-de-aburra-la-region-con-mas-accidentalidad-del-pais-201314>
- Palacio, J. (2019). *Medidas para la disminución de la accidentalidad en la avenida Las Palmas a través de modelo de predicción de velocidad de operación y la consistencia del trazado.*
- Pieters, J. (2017). Increase traffic jams caused by accidents. *NL Times*. Recuperado de <https://nltimes.nl/2017/04/07/increase-traffic-jams-caused-accidents>
- Posada, John Jairo; Farbiarz, Viviana; González, C. A. (2010). Análisis del “Pico y Placa” como restricción a la circulación vehicular en Medellín - Basado en volúmenes vehiculares. Recuperado el 9 de noviembre de 2018, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/25645/39143>
- PTV Group. (s/f). PTV Vissim.
- Rámirez, J. (2019). Se retrasa inauguración del Túnel de Oriente hasta finales de julio. Recuperado de <https://www.lafm.com.co/colombia/se-retrasa-inauguracion-del-tunel-de-oriente-hasta-finales-de-julio>
- Rebusté, F., Monzón, A., & Sarmiento, I. (1999). Una metodología simple para estimar los costes derivados de la congestión del tráfico en ciudades. Aplicación a Madrid y Barcelona. *Actas del V congreso Nacional de Economía*, 117–123.

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Saidallah, M., El Fergougui, A., & Elalaoui, A. E. (2016). A Comparative Study of Urban Road Traffic Simulators. *MATEC Web of Conferences*, 81, 05002. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168105002>
- Sarmiento, I., González, D., Lozano, A., & Salazar, J. (2003). *Costos de la Congestión en una vía urbana: aplicación a un tramo de la calle 30 de Medellín. Universidad Nacional de Medellín en: Productos de divulgación o popularización de Resultados de investigación.*
- Secretaría de Movilidad. (2013). Sistema Inteligente de Movilidad (SIMM). Recuperado el 8 de septiembre de 2018, de <https://www.medellin.gov.co/simm/>
- Secretaría de Movilidad. (2018). Pico y Placa 2018 I Semestre. Recuperado el 8 de febrero de 2018, de <https://www.medellin.gov.co/movilidad/de-interes/pico-placa>
- Secretaría de Movilidad de Itagüí. (2016). Nomina personal de la Secretaría. Recuperado el 20 de mayo de 2019, de <https://www.transitoitagui.gov.co/wp-content/uploads/2016/10/NOMINA-PERSONAL-SECRETARÍA-DE-MOVILIDAD.pdf>
- Secretaría de Movilidad de Medellín. (s/f). Paneles Informativos. Recuperado el 4 de junio de 2019, de <https://www.medellin.gov.co/SIMM/paneles-informativos/>
- Secretaría de Movilidad de Medellín. (2019). Medellín le apuesta a reducir en un 25 % el número de lesionados y muertos por incidentes de tránsito. Recuperado el 26 de mayo de 2019, de <https://www.medellin.gov.co/movilidad/component/k2/medellin-le-apuesta-a-reducir-en-un-25-el-numero-de-lesionados-y-muertos-por-incidentes-de-transito>
- SIMM. (s/f). Mapas SIMM. Recuperado de <https://www.medellin.gov.co/simm/mapas/index.html?map=camarasFotodeteccion>
- SIMM. (2016). Vías Altamente Seguras Av. Las Palmas y Túnel de Occidente.
- Steer Davies Gleave. (2009). Estudio de demanda del Túnel Aburrá - Oriente, (9), 78.
- Stenovec, T. (2015). Google has gotten incredibly good at predicting traffic — here's how. Recuperado el 16 de octubre de 2018, de <https://www.businessinsider.com/how-google-maps-knows-about-traffic-2015->
- La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.

- Tecnoligente. (s/f). Aforos vehiculares. Recuperado el 8 de septiembre de 2018, de <http://www.tecnoligente.com/ingenieria-vial/>
- Universidad Privada Domingo Savio. (2013). *Determinación del comportamiento del flujo vehicular de la ciudad de Tarija*. Domingo Savio. Recuperado de <https://www.slideshare.net/Maugesitah/publicado-1-estudio-sobre-flujo-vehicular-tarija>
- UTADEO. (s/f). Maestría en Modelado y Simulación MM&S. Recuperado el 8 de septiembre de 2018, de <https://www.utadeo.edu.co/es/link/maestria-en-modelado-y-simulacion-mms/26106/layout-1/que-es-modelado-y-simulacion-ms>
- Vahos, M. (2018). Blu Medellín. Recuperado el 12 de marzo de 2018, de <https://www.bluradio.com/medellin/pico-y-placa-ambiental-redujocontaminacion-nivel-amarillo-170353>
- Villegas, K. N. (2013). Medición de aforos en carreteras de México. Comparación de resultados entre aforo automático y aforo manual., 84.
- Vivir en el Poblado. (2018, octubre 26). Accidente en Las Palmas dejó una persona fallecida. *Vivir en el Poblado*. Recuperado de <https://www.vivirenelpoblado.com/accidente-las-palmas-camion-leche/>
- Zambrano, D. (2017). Nueva ley garantizará más control a las fotomultas. Recuperado el 15 de octubre de 2017, de <http://www.elcolombiano.com/antioquia/movilidad/nueva-ley-garantizara-mas-control-a-las-fotomultas-LX6743490>

La información presentada en este documento es de exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete a la EIA.