



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

IMPACTO DEL CAMBIO DE HORARIO EN LAS OPERACIONES DE ABASTECIMIENTO PARA EMPRESAS EN ZONAS URBANAS CONGESTIONADAS

José Sebastián Talero Chaparro

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial
Bogotá, Colombia

2020

IMPACTO DEL CAMBIO DE HORARIO EN LAS OPERACIONES DE ABASTECIMIENTO PARA EMPRESAS EN ZONAS URBANAS CONGESTIONADAS

José Sebastián Talero Chaparro

Tesis de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Industrial

Director (a):

Ph.D, Wilson Adarme Jaimes

Línea de Investigación:

Logística

Grupo de Investigación:

SEPRO

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial

Bogotá, Colombia

2020

A mis padres, hermanos y a todas las personas que con su presencia y cariño me llenan de razones para agradecer cada día.

The thrill of just the chase is worth the pain

Ronnie James Dio

Agradecimientos

Tanto ese trabajo de investigación para optar por el título de Magíster en Ingeniería Industrial, como gran parte de mi carrera profesional son lo que son hoy en día gracias al invaluable apoyo del Grupo de Investigación Sociedad, Economía y Productividad SEPRO de la Universidad Nacional de Colombia en donde, gracias a los profesores Wilson Adarme Jaimés y Juan Pablo Castrellón Torres noté por primera vez que la investigación y acción en logística puede lograr un país interconectado, generar bienestar, riqueza y que la conexión del territorio genera oportunidades, empleo y equidad.

Especialmente quiero agradecer a mi familia por ser a la vez mi fuerza y mi inspiración, cada paso en el camino es por y para ustedes.

A todos y cada uno de mis compañeros en el grupo de investigación SEPRO, por estar a mi alrededor desde el comienzo, por estar hoy, por seguir estándolo siempre.

A Johanna Benítez, por acompañarme en todos los obstáculos, por celebrar conmigo mis logros, por no dejar de creer en mí.

Resumen

Con costos logísticos que alcanzan el 13.9% como porcentaje sobre las ventas (DNP 2018) el diseño de estrategias para la gestión de la demanda de carga en grandes ciudades Colombianas es uno de los principales retos a los que se enfrentan las empresas privadas y las instituciones públicas que participan en las actividades logísticas de áreas urbanas. Buscando analizar los impactos del cambio de horario en las operaciones de abastecimiento para empresas en zonas congestionadas de Bogotá, en esta investigación se cuantifican los beneficios que traería el migrar las operaciones de distribución, transporte y abastecimiento del tradicional horario diurno a un horario no convencional, en la noche, aprovechando la disponibilidad de la infraestructura vial de la ciudad.

En este estudio se caracterizan las dinámicas de la operación logística de abastecimiento para una muestra de las empresas en zonas urbanas congestionadas de la ciudad de Bogotá, se analiza el desempeño logístico de las empresas según indicadores relevantes identificados mediante una revisión bibliográfica, se simulan las operaciones de abastecimiento a través de un modelo y se identifican los impactos y las franjas de horarios alternativos para la realización de las operaciones de abastecimiento, encontrando mejoras de 15% en el tiempo de operación, 60% en las velocidades de recorrido y 46% en el nivel de atención de los generadores de carga para franjas horarias entre las 8 pm y las 6 am.

Palabras clave: Logística Urbana, generación de viajes, entregas en horarios no convencionales, cargue y descargue.

Abstract

With logistics costs reaching 13.9% as a percentage of sales (DNP 2018), the design of strategies for managing freight demand in large Colombian cities is one of the main challenges faced by private companies and public institutions that participate in logistics activities in urban areas. In order to analyze the impacts of the change of schedule in the supply operations for companies in congested areas of Bogotá, this research quantifies the benefits that would bring from migrating the distribution, transportation and supply operations from the traditional daytime schedule to an unconventional night schedule, taking advantage of the availability of the city's road infrastructure.

This study characterizes the dynamics of the supply logistics operation for a sample of companies in congested urban areas of the city of Bogotá, the logistics performance of companies is analyzed according to relevant indicators identified through a bibliographic review, operations are simulated of supply through a model and the impacts and alternative time bands are identified for carrying out the supply operations, finding improvements of 15% in operating time, 60% in travel speeds and 46% in the level of attention of the load generators for time bands between 8 pm and 6 am.

Keywords: Urban Logisticis, Freight demand management, Off-hours delivery

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas	XIV
Introducción	15
1. Generalidades de la investigación	17
1.1 Contextualización	17
1.1.1 Antecedentes Internacionales.....	18
1.1.2 Antecedentes Nacionales	21
1.2 Problemática y relevancia de la investigación	22
1.3 Objetivos.....	26
1.3.1 Objetivo general	26
1.3.2 Objetivos específicos	26
2. Estado del arte	27
2.1 Logística y gestión de cadena de suministro	27
2.2 Logística urbana	29
2.3 Desempeño logístico	32
2.4 Sistemas de transporte de carga.....	33
2.5 Gestión de la Demanda de Transporte.....	36
2.5.1 Medidas para reducción de tráfico	38
2.5.2 Medidas para el cambio espacial de tráfico	38
2.5.3 Medidas para el cambio modal de tráfico	40
2.5.4 Medidas para el control de tráfico	41
2.5.5 Medidas para el cambio temporal de tráfico	41
2.6 Cargue y Descargue Nocturno	43
2.7 Simulación basada en agentes.....	45
3. Metodología de la investigación.....	48
3.1 Fase uno: Investigación descriptiva.....	49
3.1.1 Instrumentación y recolección de información	49
3.1.2 Caracterización de zonas urbanas y procesos logísticos	50
3.1.3 Identificación de factores críticos asociados al horario de operación	50
3.2 Fase dos: Investigación propositiva.....	51
3.2.1 Simulación basada en agentes – Diseño y validación	51

3.2.2	Propuesta de horario alternativo para la realización de las operaciones de abastecimiento y distribución.....	53
3.2.3	Implementación de horario alternativo en el modelo	53
4.	Operaciones de abastecimiento en zonas congestionadas de la ciudad de Bogotá.....	54
4.1	Generalidades	54
4.2	Generación de viajes.....	64
4.3	Problemáticas asociadas al horario de operación	72
5.	Horario alternativo para operaciones de abastecimiento.....	75
5.1	Impacto del cambio de horario en las operaciones de abastecimiento	75
5.2	Modelo conceptual	76
5.2.1	Objetivos del modelo	77
5.2.2	Agentes y procesos	77
5.2.3	Supuestos del modelo	79
5.2.4	Funcionamiento del modelo, Variables de decisión y datos utilizados	80
5.3	Modelo de simulación	82
5.4	Implementación	83
5.4.1	Resultados – Escenario Diurno	86
5.4.2	Resultados – Escenario Nocturno	88
5.4.3	Resultados – Comparación de escenarios	90
6.	Conclusiones y recomendaciones.....	93
6.1	Conclusiones	93
6.2	Recomendaciones.....	94
7.	Anexo 1. Protocolo ODD	107
7.1	Descripción general.....	107
7.1.1	Propósito.....	107
7.1.2	Entidades, variables y escalas.....	107
7.1.1	Proceso.....	108
7.2	Conceptos de diseño.....	108
7.2.1	Antecedentes teóricos y empíricos	108
7.2.2	Decisiones individuales.....	109
7.2.3	Escaneo individual del entorno	109
7.2.4	Interacción	109
7.2.5	Observación.....	109
7.3	Datos de entrada	109

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Ciudades más congestionadas del mundo	23
Figura 2. Horas promedio perdidas debido a congestión por persona	24
Figura 3. Alcance de revisión de literatura	27
Figura 4. Proyección de crecimiento poblacional a 2100	30
Figura 5. Metodología de investigación.....	48
Figura 6. Metodología de Caracterización y Parametrización CAP	52
Figura 7. UPZ La Sabana.....	55
Figura 8. UPZ La Candelaria.....	56
Figura 9. UPZ Zona Industrial	57
Figura 10. Relaciones entre actores	59
Figura 11. Roles de las empresas encuestadas	60
Figura 12. Promedio de viajes requeridos por las empresas diariamente	61
Figura 13. Número de vehículos utilizados por las empresas diariamente	61
Figura 14. Días a la semana en que se requiere transporte de carga	62
Figura 15. Promedio de kilómetros diarios recorridos – camiones 2 ejes.....	63
Figura 16. Promedio de kilómetros diarios recorridos – camiones 3 ejes.....	64
Figura 17. Volúmenes horarios de los vehículos de carga en Bogotá	65
Figura 18. Horarios de operación por sector económico	66
Figura 19. Volumen de vehículos de carga por acceso vial a Bogotá D.C.	67
Figura 20. Número de operaciones de descargue según actividad económica – UPZ Zona Industrial	68
Figura 21. Número de operaciones de cargue según actividad económica – UPZ Zona Industrial.....	68
Figura 22. Número de operaciones de descargue según actividad económica – UPZ Puente Aranda	69
Figura 23. Número de operaciones de cargue según actividad económica – UPZ Puente Aranda.....	70
Figura 24. Número de operaciones de descargue según actividad económica – UPZ La Sabana.....	71
Figura 25. Número de operaciones de cargue según actividad económica – UPZ La Sabana.....	71
Figura 26. Número de operaciones de descargue según actividad económica – UPZ Las Nieves	72
Figura 27. Velocidad promedio general (km/h) para la ciudad de Bogotá	72

Figura 28. Modelo Conceptual	78
Figura 29. Ambiente de simulación del modelo - Diurno	84
Figura 30. Ambiente de simulación del modelo - Nocturno	84
Figura 31. Velocidades promedio – Escenario Diurno	86
Figura 32. Velocidades promedio – Escenario Nocturno	89

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Stakeholders involucrados en sistema de transporte de carga	34
Tabla 2. Posibles impactos en <i>stakeholders</i> por cambio de horario en operaciones.....	75
Tabla 3. Indicadores evaluados.....	85
Tabla 4. Resultados – Escenario Diurno	87
Tabla 5. Resultados – Escenario Diurno análisis de sensibilidad	88
Tabla 6. Resultados – Escenario Nocturno	89
Tabla 7. Resultados – Escenario Nocturno análisis de sensibilidad	90
Tabla 8. Resultados – comparativo	91

Introducción

Las actividades propias de las empresas y en particular, los procesos de abastecimiento, transporte y distribución, generan en su desarrollo diario necesidades de tránsito de vehículos y mercancías que inevitablemente impactan en la movilidad de la ciudad. El crecimiento poblacional en áreas urbanas y las dinámicas de consumo actuales, crea una alta demanda de infraestructura vial, que al ser compartida por multiplicidad de actores deriva en ineficiencias en las operaciones logísticas producidas por la congestión vehicular.

Ante la necesidad de mitigar las problemáticas que aquejan a las ciudades, la investigación científica ha abordado diversas alternativas de solución. Una de ellas, que será el foco de atención de este trabajo, se refiere a la implementación de programas de entregas fuera del horario convencional, que resulten en distribuir la demanda de infraestructura a lo largo de las 24 horas del día y así, equilibrar la ocupación de las vías en la ciudad.

Las ventajas que el desarrollo de este tipo de estrategias, han sido demostradas a través de experiencias nacionales e internacionales, como el trabajo desarrollado en Manhattan y los pilotos llevados a cabo en Bogotá, Cali, Barranquilla y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en donde emplear horarios fuera de hora pico para la realización de operaciones de cargue y descargue, trajo consigo implicaciones positivas en términos ambientales, de movilidad y de desempeño logístico, no solo para las empresas que reciben las mercancías sino para los transportadores, las empresas generadoras de carga y la ciudad en general.

Sin embargo, la implementación de programas de transporte, entrega, cargue y descargue nocturno no se ha desarrollado aun considerando las limitaciones en ubicación, infraestructura, capital de trabajo o articulación que se presentan en las operaciones diarias de los actores del sistema logística en la ciudad ya sean generadores, transportadores o demandantes de carga.

Por esta razón, en este trabajo se busca cuantificar los beneficios que la migración del horario de operaciones traería para las empresas de la ciudad. El documento está dividido en seis secciones, siguiendo la metodología diseñada para el cumplimiento de los objetivos propuestos.

En el capítulo 1 se presenta una contextualización general del objeto de estudio y de los principales antecedentes en términos de estudios nacionales e internacionales sobre la implementación de programas de entregas en horarios no convencionales, la descripción del problema y los objetivos propuestos. El capítulo 2 relaciona el estado del arte construido para dar sustento a la investigación realizada haciendo especial énfasis en las alternativas de gestión de demanda de carga y las implicaciones que trae el cambio de horario en las operaciones logística en las ciudades.

En el tercer capítulo se presenta la metodología diseñada para el desarrollo de esta investigación en dos etapas, la primera, de investigación descriptiva en donde se incluyen actividades de recolección de información, caracterización de las zonas urbanas y los procesos logísticos, además de una identificación de los factores críticos asociados al horario de operación. La segunda etapa corresponde a la investigación propositiva, en donde se modelan las dinámicas de operación en un modelo de simulación y a partir de los resultados comparativos entre los escenarios diurno y nocturno se propone un horario alternativo para el desarrollo de las actividades logísticas.

El capítulo 4 corresponde a la caracterización de las dinámicas de operación en la ciudad de Bogotá y se presentan las características identificadas en términos de congestión, disponibilidad de la infraestructura, generación de viajes y utilización de la flota vehicular por parte de las empresas de la ciudad, para la construcción de esta sección se utilizan tanto fuentes primarias como secundarias y sirve como insumo para el capítulo 5, correspondiente al diseño, construcción e implementación de un modelo de simulación en dos escenarios, diurno y nocturno. Finalmente, el capítulo 6 presenta las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

1. Generalidades de la investigación

1.1 Contextualización

El mundo está experimentando actualmente una movilización poblacional importante en la que las personas migran de las zonas rurales a las urbanas a gran velocidad, lo que trae consigo una serie de retos para la movilidad, la sostenibilidad y la habitabilidad así como oportunidades para impulsar el crecimiento sostenido y resiliente. (World Bank, 2018). Actualmente, el 52% de la población mundial vive en zonas urbanas y se proyecta que para el 2050 el 67% de las personas, es decir 7 de cada 10, vivirán en las ciudades. Adicionalmente, las cifras del Banco Mundial calculan que la demanda de bienes asociada al crecimiento de la población urbana podría llegar a triplicar su volumen actual creando así la necesidad de mejoras en la infraestructura y de un aumento en la cobertura y la calidad de los servicios urbanos.

Así mismo, la generación de empleo y la actividad económica se concentran especialmente en las grandes ciudades. Investigaciones llevadas a cabo alrededor del mundo concuerdan con que alrededor del 80% de la actividad económica global se concentra en las zonas urbanas (World Bank, 2018). En Colombia, Bogotá y Medellín aportan cerca del 40% del PIB (DANE, 2019). Este conjunto de características hace que llevar a cabo actividades económicas en las ciudades sea una labor tanto relevante como compleja.

La demanda de mercancías que las personas y empresas generan diariamente en el contexto urbano trae consigo la necesidad de movilizar vehículos utilizando la infraestructura vial disponible e impactando así en la movilidad de la ciudad. Este fenómeno se hace especialmente evidente con el desarrollo de zonas urbanas en las que se ubican numerosos establecimientos, en donde se crean conglomeraciones de empresas que realizan sus operaciones de abastecimiento y distribución, y generando congestión vehicular que deriva a su vez en ineficiencias en las operaciones logísticas.

Ante la necesidad de mitigar las principales externalidades y problemáticas que aquejan a las ciudades (congestión, contaminación, y accidentalidad), con el propósito de atender y facilitar la seguridad alimentaria (disposición y acceso a los alimentos y demás productos que demanda la población) y permitir la operación manufacturera y de servicios de las ciudades, la investigación científica ha abordado diversas alternativas para dar solución.

Una de ellas, por ejemplo, se refiere a la implementación de programas de entregas fuera del horario convencional¹, con el fin de lograr distribuir la demanda de infraestructura a lo largo de las 24 horas del día, y así equilibrar la ocupación de las vías en la ciudad mitigando los impactos de la congestión en las operaciones de abastecimiento y distribución de las empresas.

Las ventajas del desarrollo de este tipo de estrategias han sido demostradas a través de experiencias nacionales e internacionales, como el trabajo desarrollado en Manhattan (Brom et al., 2011) y los pilotos llevados a cabo por el Grupo SEPRO “Sociedad Economía y Productividad” de la Universidad Nacional de Colombia en las ciudades de Bogotá, Cali, Barranquilla, Buenaventura y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en donde emplear horarios distintos de la hora pico para la realización de operaciones de cargue y descargue trajo consigo implicaciones positivas en términos ambientales, de movilidad y de desempeño logístico, no sólo para las empresas que reciben las mercancías sino para los transportadores, las empresas generadoras de carga y la ciudad en general.

1.1.1 Antecedentes Internacionales

Se reconoce cada vez más que incluso las ciudades con congestión severa durante las horas pico tienen capacidad vial disponible durante las noches, las tardes y las mañanas tempranas. Las políticas que cambian las entregas de bienes urbanos de los horarios convencionales (pico) a las horas no convencionales tienen el potencial de aumentar la eficiencia de la distribución de carga, así como de reducir los impactos externos negativos (Fu & Jenelius, 2018).

Holguín-Veras *et al.* (2005) establecen la iniciativa de abastecimiento en horas no convencionales para el caso de Nueva York en Estados Unidos. Esta región metropolitana es mundialmente conocida como una de las zonas con mayor concentración de instalaciones de transporte en el mundo, incluidos tres aeropuertos, docenas de terminales de contenedores, patios intermodales y más de 17.800 kilómetros de carreteras, lo que trae consigo grandes retos para la movilización de pasajeros y carga, especialmente en

¹ Horario en el que se desarrolla habitualmente la actividad laboral de la mayoría de la población. Las empresas generalmente reciben su mercancía durante horarios comprendidos entre 8 AM – 6 PM o 9 AM – 5 PM (Holguín-Veras, Polimeni, et al., 2005).

términos de congestión. En su investigación, establecen un marco descriptivo de los obstáculos percibidos (definición de políticas, disposición de empresas para coordinarse, e incentivos) y el potencial de entregas fuera de horas pico, a partir de la recopilación de la opinión de los *stakeholders* en la ciudad.

En reportes posteriores, se establecieron las políticas y programas que podrían incentivar un cambio en el horario en el que se realizan las entregas en la ciudad, cuantificando la efectividad de la implementación de dicha iniciativa en el costo total de la operación, mostrando una disminución de hasta 28% en los costos en los que se incurría al implementar un horario no convencional para la movilización de carga (Holguín-Veras & Polimeni, 2006). Se destacan en este documento la participación del gobierno en términos de política pública e incentivos económicos y tributarios para aumentar la participación de las empresas en esta iniciativa.

En ciudades de Europa como Barcelona y Dublín se implementaron posteriormente experiencias exitosas con pruebas en la entrega nocturna reemplazando un número (mayor) de vehículos que operan durante el día por un número (menor) de vehículos que operan durante la noche (Forkert & Eichhorn, 2007), identificando entre otros beneficios la reducción de los retrasos de hasta un 30% para los proveedores de servicios logísticos al utilizar las capacidades de carreteras gratuitas en la noche; además, se demostró que una entrega silenciosa en horarios no convencionales es posible al mostrar diferencias de solo 0,1 dB en promedio durante el descargue con respecto al ruido ambiente en noches en las que no se presentaba descargue.

En Bélgica se realizó un estudio en el año 2010 para evaluar el impacto del apoyo público en la eficiencia de las entregas nocturnas en ciudades de este país. Se identificó que alentar o incluso imponer entregas nocturnas son medidas potenciales para mejorar el tráfico urbano y lograr que los bienes aún puedan entregarse de manera eficiente. Sin embargo, también se evidenciaron algunas desventajas en las entregas por la noche como molestias por ruido causadas por la carga y descarga de camiones, la necesidad de una mayor disponibilidad del receptor y algunos problemas de responsabilidad (Verlinde *et al.*, 2010).

A partir de la implementación del piloto de cargue y descargue nocturno en la ciudad de Nueva York, Holguín-Veras *et al.* (2014) discuten las lecciones aprendidas durante su

implementación y el importante papel que puede desempeñar la investigación de vanguardia en la definición de nuevos paradigmas de los sistemas de transporte urbano. Identificaron los caminos más efectivos para lograr los objetivos deseados: formar coaliciones de agentes de cambio que involucren a socios del sector público y privado; y la importancia de definir vías de implementación para conceptos prometedores, a la vez que se deben tener en cuenta las complejas realidades políticas de los entornos urbanos modernos. Estas lecciones se enmarcan en los contextos duales de los principios fundamentales que deberían guiar los esfuerzos de sostenibilidad y las condiciones del mercado que influyen en el comportamiento de los participantes de los sistemas de transporte urbano.

Entre 2014 y 2016, la ciudad de Estocolmo llevó a cabo un proyecto piloto que permitía entregas de bienes en el interior de la ciudad con camiones pesados por la noche, evaluándose factores claves como la facilidad de conducción, energía, eficiencia del servicio y confiabilidad de la entrega. Fu & Jenelius (2018) identificaron que el impacto es positivo en todas las dimensiones evaluadas (conducción, entregas confiables, eficiencia energética, y eficiencia en el servicio) al implementar una estrategia de movilización de carga en horarios nocturnos. Sin embargo, el estudio no mostró importantes ganancias en la estrategia aplicada en el horario de medio día. En conclusión, para las ciudades con congestión variable durante el día como Estocolmo, los resultados sugieren que las entregas nocturnas aumentan principalmente la flexibilidad de programación de los transportistas y los destinatarios a través de la introducción de horarios adicionales.

Li (2015) evalúa en este mismo piloto implementado en Estocolmo la eficiencia del transporte en horarios no convencionales en términos de tiempo de viaje, velocidad promedio, consumo de combustible, tiempo de servicio y tiempo de llevada a las tiendas, presentando resultados positivos y recomendando un horario para el transporte de bienes desde las 18:30 a las 6:00 de la madrugada.

El mundial de fútbol que se disputó en Brasil brindó la oportunidad de cambiar el horario de las operaciones de movilización de carga en la ciudad de Sao Paulo en el año 2014, resultando en un incremento en la productividad de las entregas en el horario nocturno y disminuyendo la cantidad de vehículos requeridos para la operación, lo que trae beneficios como una mejora en la velocidad en las vías del 200%. En este estudio se identificó que para la ejecución de la operación en un horario comprendido entre las 22:00 y las 6:00 de

la mañana se debe incurrir en un costo de contratación de personal adicional, el cual debe ser considerado al momento de evaluar el costo – beneficio de un cambio de horario (Bertazzo et al., 2016).

En Canadá, un piloto de entrega en horarios no convencionales para la cadena de suministro del helado de Nestlé fue implementado para evaluar los beneficios, obstáculos y la regulación requerida para aplicarlo no sólo en esta cadena sino en el transporte y entrega de bienes en todo el país (McPhee *et al.*, 2015). Sus resultados concluyen que la utilización de los camiones involucrados en la operación mejora con la implementación de esta iniciativa, disminuyendo la cantidad de rutas requeridas entre un 3% y un 10%. Se recomienda en este documento la investigación de técnicas de monitoreo y reducción de ruido para aplicarlo en esta iniciativa.

1.1.2 Antecedentes Nacionales

En el contexto colombiano, los esfuerzos por formular estrategias que mitiguen las externalidades negativas de la distribución urbana de mercancías han sido liderados por las instituciones públicas que tienen a su cargo la gestión del transporte y la movilidad en la ciudad y el país: La secretaría Distrital de Movilidad en Bogotá y el Ministerio de Transporte de Colombia.

Durante el último trimestre del año 2015 y el primer semestre de 2016, El Grupo de investigación en logística SEPRO de la Universidad Nacional de Colombia desarrolló el primer piloto de cargue y descargue nocturno en la ciudad de Bogotá contando con la participación de 17 empresas de la ciudad, en las que se incluyeron tanto generadores de carga, como transportadores y receptores. El estudio se enfocó en identificar los impactos en movilidad, seguridad, ambiente y desempeño logístico al cambiar el horario de las actividades de abastecimiento y distribución para las empresas participantes, además de explorar inicialmente la percepción de los participantes ante una eventual implementación de la iniciativa como programa permanente.

Los resultados de este estudio arrojaron variaciones de hasta 50.21% en el tiempo de recorrido entre el horario diurno y nocturno, pasando de recorridos de hasta 84.4 minutos en el día a 42.03 minutos en la noche. Dicha reducción en los tiempos genera a su vez una mejora en los tiempos de servicio que ofrecen las empresas a sus clientes aumentando de esta manera sus índices de productividad.(Adarme et al., 2016). En el contexto de esta

investigación la congestión vehicular se entiende como la saturación del flujo vehicular causada por paradas o por disminuciones considerables en la velocidad promedio. En este aspecto, los datos obtenidos mostraron que en promedio en el día se presentan 27 puntos de congestión frente a 15 registrados en la noche, mostrando el efecto de transitar por vías con una menor cantidad de flujo vehicular. La velocidad, por su parte registró una variación del 114,76 % entre día y noche, pues se registró una velocidad promedio de 8 km/h en los recorridos diurnos a 17,19 km/h en los recorridos nocturnos.

Ante los resultados positivos del piloto desarrollado en la ciudad de Bogotá, el Ministerio de Transporte tomó la decisión de replicar la metodología en 4 ciudades más del territorio nacional, Cali, Buenaventura, Barranquilla y Medellín alcanzando en todas ellas resultados similares. En estos nuevos estudios, se alcanzó la participación de 62 empresas alcanzando un ahorro en los tiempos de recorrido de entre 28% y 52% y un aumento de entre 37% y 51% en las velocidades de recorrido. Las características específicas de la infraestructura disponible en cada una de las ciudades objeto de estudio, así como las diferencias en las dinámicas de comercio, incluyendo aspectos culturales y de política pública propios de cada región, fueron factores que influyeron significativamente en los resultados del estudio y de los cuales se desprendieron las recomendaciones individuales para la implementación de programas permanentes en cada contexto.

1.2 Problemática y relevancia de la investigación

Las estrategias de distribución nocturna de mercancías han sido implementadas o propuestas en diversos lugares, destacándose su implementación en Nueva York (EE.UU.), Barcelona (España), y Londres (Reino Unido); también se ha propuesto su implementación en las grandes ciudades de Brasil como Sao Paulo y Rio de Janeiro. Así mismo en las ciudades de Bogotá, Cali, Buenaventura, Medellín y Barranquilla se realizaron pilotos de cargue y descargue nocturno que contaron con la participación de empresas generadoras, transportadoras y receptoras de carga. Todos estos esfuerzos, se han enfocado en identificar una estrategia que permita aumentar la cantidad de entregas fuera de horas pico, reduciendo el tránsito de camiones durante las horas más congestionadas, buscando reducir la contaminación, la congestión, accidentalidad y la frustración del público.

En Bogotá, existen serias problemáticas asociadas a la alta afluencia de vehículos en las vías de la ciudad. Para el 2018, la ciudad de Bogotá fue catalogada como la tercera con mayor nivel de congestión a nivel mundial solo por debajo de Moscú y Estambul (Ver Figura 1), alcanzando además el primer lugar como la ciudad en la que más horas se pierde por congestión con 272 horas al año debido a esta externalidad (INRIX, 2018). Esta realidad ha sido la principal motivación para la puesta en marcha de programas de entregas en horarios no convencionales que han sido liderados en Bogotá principalmente por la Secretaría Distrital de Movilidad, la Cámara de Comercio de Bogotá y la Asociación Nacional de Industriales ANDI.

Figura 1. Ciudades más congestionadas del mundo



Fuente: Tomado de (INRIX, 2018)

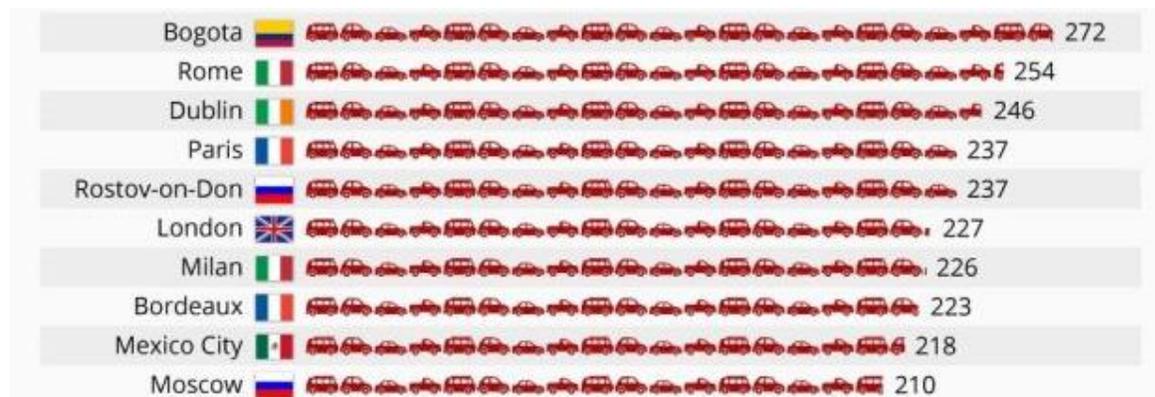
Los pilotos realizados en el contexto colombiano han contado con la participación de empresas mayoritariamente del sector industrial, grandes compañías que dentro de su modelo de negocio incluyen la recepción y el envío de grandes volúmenes de mercancías y que por lo general cuentan con una infraestructura propia para realizar sus operaciones de cargue y descargue; estas características fueron beneficiosas para las investigaciones realizadas pues los participantes accedían más fácilmente a experimentar con el cambio de horario de operaciones y contaban con recursos para garantizar la seguridad, vincular al personal necesario para supervisar los despachos y las entregas de mercancías, y modificar la planeación de la flota de vehículos relacionada con la operación.

Aun cuando los resultados de los pilotos realizados fueron positivos y llevaron a la formulación de programas de implementación continuo, la falta de articulación entre

actores, especialmente demandantes de carga, constituye una limitante en la implementación real de la iniciativa como una práctica recurrente para las empresas en el contexto urbano. Como lo indican las experiencias anteriores (Holguín-Veras, Polimeni, et al., 2005), la implementación exitosa de las iniciativas de entrega fuera de las horas pico requiere abordar adecuadamente cuestiones clave, que incluyen: costos adicionales para los generadores, receptores y transportistas e impedimentos regulatorios y legales, así como posibles barreras tecnológicas y socio demográficas.

Adicionalmente, para las empresas más pequeñas que no han hecho parte de los pilotos ya mencionados, que en cantidad superan ampliamente a las grandes y que se encuentran ubicadas en zonas congestionadas, existe una limitante adicional relacionada con la disponibilidad de la infraestructura para el cargue y descargue de mercancías y otras barreras objeto de la investigación (p.ej. asimetrías tecnológicas). Según datos recolectados durante el piloto desarrollado en Bogotá 67% de las entregas son realizadas en las vías públicas (Adarme et al., 2016), lo que dificulta aún más la aplicación voluntaria de entregas nocturnas a gran escala.

Figura 2. Horas promedio perdidas debido a congestión por persona



Tomado de (INRIX, 2018)

Una comprensión sólida de los impactos de las iniciativas de entrega fuera de horas pico en los actores del sistema logístico de las ciudades, así como la cuantificación de su beneficio a gran escala, requiere de esfuerzos adicionales en investigación y la utilización de herramientas donde se evalúen diferentes alternativas disponibles (p.ej. modelación exacta, metaheurísticas y técnicas de simulación) que consideren los cambios organizacionales que no pueden aplicarse normalmente a gran escala debido a la falta de

articulación, la resistencia natural al cambio y los posibles costos relacionados a la migración inicial de las operaciones a un horario nocturno.

Por lo anterior, esta investigación busca identificar los posibles impactos relacionados al cambio de horario en las operaciones de cargue y descargue para las empresas generadoras, transportadoras y receptoras de carga que se ubican en las zonas con mayor congestión en las ciudades, permitiendo identificar los factores logísticos que se verían beneficiados con la implementación de esta alternativa a la movilización de mercancías en áreas urbanas (p. e. productividad empresarial).

En aras de desarrollar esta investigación se propone la siguiente pregunta: ***¿Cuál es el impacto del cambio de horario de las operaciones de abastecimiento en el desempeño logístico de las empresas en zonas urbanas congestionadas?***

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar el impacto que tiene el cambio de horario de las operaciones logísticas de abastecimiento en el desempeño logístico de las empresas en zonas urbanas congestionadas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las dinámicas de la operación logística de abastecimiento para una muestra de las empresas en zonas urbanas congestionadas.
- Analizar el desempeño logístico de las empresas y la eficiencia de las operaciones de abastecimiento a través de un modelo de simulación.
- Identificar horarios alternativos para la realización de las operaciones de abastecimiento de las empresas en zonas urbanas congestionadas.
- Evaluar indicadores de desempeño logístico y eficiencia en el abastecimiento de las empresas en horarios alternativos a través del modelo de simulación.

2.Estado del arte

En esta sección se relaciona la revisión de literatura sobre la importancia de la logística en la cadena de suministro, la logística urbana y los sistemas de transporte de carga en los que se soporta, así como las alternativas existentes para la gestión de abastecimiento y suministro en la ciudad, especialmente el concepto de cargue y descargue nocturno. Las palabras claves identificadas fueron *city logistics*, *off – peak delivery*, y *delivery and distribution management strategies*.

El alcance propuesto para la revisión de literatura parte de la importancia de la logística en el marco de la gestión de la cadena de suministro, el desempeño logístico de la cadena y la competitividad, especialmente para la logística urbana y las alternativas de gestión de la demanda de transporte existentes en la literatura, enfocándose particularmente en la iniciativa de cargue y descargue nocturno.

Figura 3. Alcance de revisión de literatura



Fuente y elaboración propia

2.1 Logística y gestión de cadena de suministro

La logística es uno de los factores más importantes de la gestión de la cadena de suministro. Es el factor básico de éxito para cada empresa y evoluciona en todas las operaciones que suceden en el negocio debido a que el volumen de carga que manejan las organizaciones aumenta, y garantizar el cumplimiento de los requisitos del cliente se hace cada vez más difícil.

Christopher (2005) define el concepto de logística como:

“la parte de la gestión de la cadena de suministro que planea, implementa y controla el flujo hacia adelante (y hacia atrás) de bienes, servicios y su información relacionada entre el punto de origen y el punto de destino con el objetivo de satisfacer las necesidades del consumidor”.

Suministrar bienes al consumidor según su demanda y brindar el mejor servicio son los objetivos más importantes de la logística en una cadena de suministro. Por esta razón, se aplica a todos los procesos involucrados en el transporte, almacenamiento, empaque y gestión final de bienes, y se busca reducir en la medida de lo posible los costos en los que se incurre, mejorando la eficiencia del proceso en la cadena de suministro.

De acuerdo con Kherbach y Liviu (2016), un mercado con instalaciones de gestión de la cadena de suministro y logística bien organizadas tiene una ventaja calificada sobre otras economías, mientras que mejorar la infraestructura logística puede servir como una herramienta competitiva y también es eficaz para aumentar la competitividad de la organización frente a otros en el mercado.

Mentzer *et al.* (2001) definen la gestión de la cadena de suministro como la “coordinación sistémica y estratégica de las funciones operativas y tácticas, tanto dentro como fuera de la organización, con el propósito de mejorar el desempeño a largo plazo de las compañías individuales y la cadena de suministro en su conjunto”. La integración de la logística es un elemento indispensable de la gestión en la cadena de suministro (Chen & Paulraj, 2004) ya que permite la creación de valor a través de la reducción de costos operacionales y la mejora de los servicios al cliente, alcanzando una ventaja competitiva.

El Consejo de profesionales de gestión de la cadena de suministro incorpora en su definición de la gestión de cadena de suministro a la logística como una función clave centrada en la cadena, reforzando su competitividad y el desempeño de las organizaciones (Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP), 2013):

“SCM es la filosofía de gestión que implica la gestión e integración de un conjunto de procesos comerciales clave seleccionados desde el usuario final hasta los proveedores originales – incluyendo la logística –, que proporciona productos, servicios e información que agregan valor para los clientes y otras partes interesadas

a través de los esfuerzos de colaboración de los miembros de la cadena de suministro”.

Morash y Clinton (1997) establecieron en su investigación la importancia de incluir la capacidad logística y de transporte en una organización como el enlace entre la estructura de la cadena de suministro y el desempeño de la misma, al vincular proveedores, fabricantes, clientes y distribuidores a lo largo de la operación. Green *et al.* (2008) complementa este concepto al indicar que la construcción del desempeño logístico refleja el desempeño de la organización en lo que se refiere a su capacidad para entregar bienes y servicios en las cantidades precisas y en los momentos precisos requeridos por los clientes.

2.2 Logística urbana

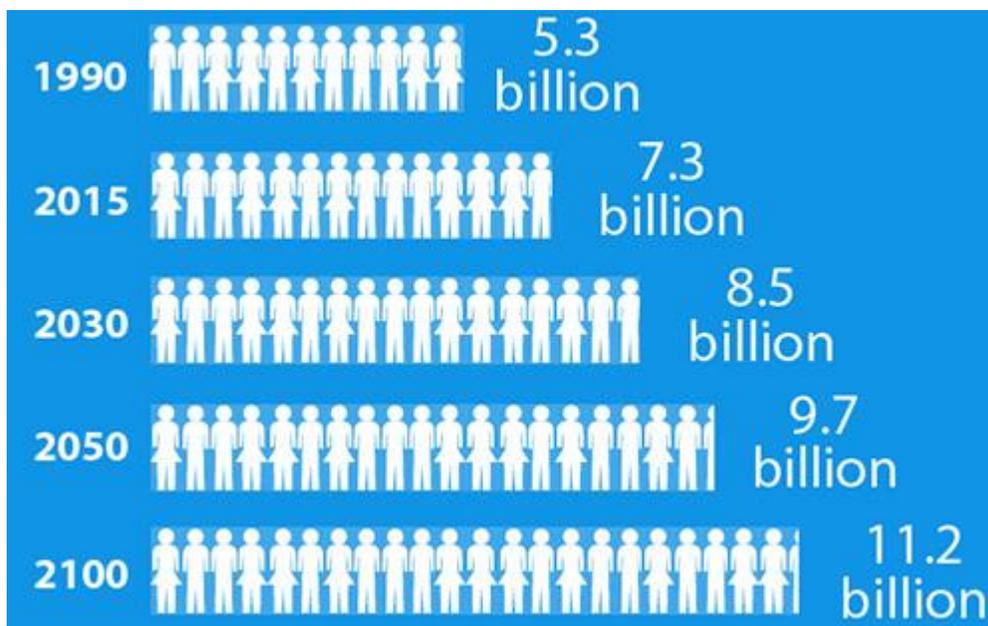
La gestión de la logística es importante para comprender las implicaciones que aparecen en un sistema de distribución de mercancías al enfrentarse a tramos de recorrido con altas afluencias vehiculares, escasa infraestructura para el cargue y descargue y baja o nula coordinación entre actores, especialmente al tener en cuenta que los centros poblados demandan la mayor parte de las necesidades de abastecimiento del mundo.

En las últimas décadas la población urbana ha crecido rápidamente, representando aproximadamente un 25% de la población mundial en la década de 1950 y alcanzando el 50% en el año 2014, con una proyección a ser cercana al 75% para el año 2050, lo que representaría una cifra cercana a los 6.400 millones de personas (United Nations, 2014) (Ver Figura 4). Este crecimiento es de gran relevancia para la planificación de las ciudades y de los procesos de abastecimiento y distribución en las empresas, ya que los centros urbanos son por naturaleza el centro de demanda de bienes, servicios y por ende de actividades logísticas.

Taniguchi *et al.* (2012) definen la logística urbana como el “proceso que busca optimizar la logística y las actividades de transporte con el apoyo de sistemas de información en áreas urbanas, teniendo en cuenta su tráfico, congestión, seguridad y ahorros de energía dentro del marco de la economía de mercado”. La logística urbana busca integrar los recursos existentes para resolver las dificultades causadas por los impactos de la población creciente (Tseng *et al.*, 2005) y su demanda en auge de bienes y servicios. Teniendo en

cuenta que esta demanda se transforma en viajes de vehículos comerciales de entrega de bienes que resultan en más congestión, contaminación y reducción de accesibilidad y seguridad en las áreas de la ciudad, las decisiones relacionadas con la carga son cada vez más importantes.

Figura 4. Proyección de crecimiento poblacional a 2100



Fuente: (United Nations, 2014)

Para la gestión de escenarios en los que la demanda de las ciudades es creciente, investigadores y creadores de política pública han identificado aspectos relevantes para la planificación urbana como la definición de espacios transitables, la utilización adecuada del espacio, el desarrollo de técnicas y tecnologías de operación que faciliten el movimiento de pasajeros y carga, y la promoción del uso del transporte público (Smart Growth Network et al., 2002).

En el caso específico del transporte de carga, la intervención del sector público se ha limitado a formular medidas que no necesariamente impactan de forma positiva en el desarrollo de la logística en la ciudad, como las restricciones basadas en horarios o tamaños de los vehículos, los cobros por congestión, los centros de consolidación, etc. (Holguín-Veras et al., 2017). Ambrosini y Routhier (2004) clasifican los modelos de carga urbana encontrados en la literatura en dos (2) familias: a) Modelos operativos que están

principalmente dirigidos hacia la mejora de la gestión del flujo y b) Modelos sistémicos, destinados a evaluar el impacto de las modificaciones de la logística urbana en los flujos generados.

Para comprender la relevancia de un modelo de carga urbana es clave identificar los diferentes actores involucrados en la operación de logística urbana. Teniendo en cuenta que aunque el movimiento de carga estudiado se limita principalmente a las áreas urbanas, sus raíces se expanden a nivel regional, nacional e internacional, haciendo que el dominio de carga urbana esté compuesto por múltiples flujos de productos, múltiples cadenas de suministro y múltiples actividades de transporte.

De acuerdo con Boerkamps *et al.* (2000), los cuatro principales interesados que afectan principalmente a los dominios de carga urbana son; generadores, transportistas, clientes o receptores y administradores (sector público). Estas partes interesadas pertenecen a diferentes partes del sistema logístico de transporte de carga de la ciudad y están estrechamente conectadas con al menos un componente, pero están conectadas de manera flexible a todo el dominio. Aunque la acción de una parte interesada afecta a todo el dominio, una parte interesada solo puede influir en la parte a la que está estrechamente relacionada.

Adicionalmente, Butrina *et al.* (2017) describen otros elementos clave en el desarrollo de la logística de última milla con un enfoque paso a paso desde la perspectiva del vehículo que realiza la operación. Las restricciones de horarios en que los vehículos pueden o no transitar y las restricciones de uso espacios de parqueo influyen en las decisiones del conductor del vehículo limitando la elección de rutas e incluso, llevándolo a elegir alternativas de parqueo ilegales o inconvenientes, como el parqueo en andenes o dobles líneas. Además, el diseño geométrico de las vías y de la infraestructura para el cargue y descargue deben ser acordes a las dimensiones de los vehículos comúnmente usados, evitando maniobras complejas o peligrosas que entorpezcan la operación.

Otro aspecto a considerar para una buena operación de última milla tiene que ver con la utilización de tecnología, según Schöder *et al.* (2016), los precios, la variedad de selección, la conveniencia y el ahorro en tiempos han incrementado dramáticamente la participación del e-commerce en las dinámicas logísticas de las ciudades, trayendo consigo desafíos importantes relacionados al aumento de las entregas y el tráfico vehicular. Tamaños de

pedido más pequeños y aumento en los viajes causan congestión y contaminación en áreas densamente pobladas, lo que lleva a la autoridad pública a restringir el acceso de vehículos de carga en zonas urbanas, resultando en cuellos de botella para el desarrollo de las actividades logísticas.

2.3 Desempeño logístico

El transporte de carga constituye un elemento de gran importancia en la logística de una operación porque permite movilizar materiales, insumos y alimentos que permiten sostener asentamientos urbanos y mantener la forma de vida de sus habitantes. Con el crecimiento constante del comercio mundial surge la necesidad de ofrecer un servicio de transporte eficiente, económico y de calidad, con el fin de contribuir con el aumento de la competitividad de un país. Mentzer et al. (2001) definen el desempeño logístico como el análisis de la eficiencia y la eficacia de una actividad logística, especialmente en cómo se utilizan los recursos de una organización.

Debido a que la mayoría de las industrias y sectores económicos basan su actividad en la distribución de bienes, el transporte de carga también resulta ser un factor determinante en la formación y fortalecimiento de relaciones en el mercado, lo cual también presenta una oportunidad para ampliar la cobertura a lugares aislados del territorio nacional y una mejora en la prestación del servicio. A nivel nacional, se ha resaltado la necesidad de monitorear los procesos involucrados en la logística del transporte y los sobrecostos en los que se incurre, teniendo en cuenta la incidencia de este tópico en la competitividad y el desempeño logístico del país.

Es así como el Banco Mundial realiza la medición del desempeño logístico (LPI, por sus siglas en inglés) de 160 países para identificar sus retos y oportunidades, basados en una encuesta mundial que evalúa de forma cualitativa y cuantitativa el desempeño logístico en seis (6) dimensiones clave: Eficiencia del proceso de despacho (es decir, velocidad, simplicidad y previsibilidad de los trámites) por parte de las agencias de control fronterizo, incluidas las aduanas; calidad de la infraestructura relacionada con el comercio y el transporte (por ejemplo, puertos, ferrocarriles, carreteras, tecnología de la información); facilidad de organizar envíos a precios competitivos; competencia y calidad de los servicios logísticos (por ejemplo, operadores de transporte, agentes de aduanas); capacidad para

rastrear envíos; y puntualidad de los envíos para llegar al destino dentro del tiempo de entrega programado o esperado (Banco Mundial, 2018).

En el contexto colombiano se encuentra la Encuesta Nacional Logística (ENL), un reporte que presenta el Departamento Nacional de Planeación para analizar el desempeño y la calidad de los servicios logísticos de las empresas en el país. Esta encuesta evalúa aspectos como la tercerización de procesos logísticos, comercio exterior, acciones del gobierno, costos, tiempo y productividad de las empresas (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

Teniendo en cuenta que mejorar el desempeño logístico es una prioridad clave para las organizaciones, la importancia de la gestión logística y el transporte han ido creciendo en varias áreas. El elemento clave en una cadena logística es su sistema de transporte, ya que une las actividades que realizan de forma separada tanto al interior de la empresa como entre varias compañías, requiriéndose en todos los procedimientos de producción, desde la fabricación hasta la entrega a los consumidores finales y las devoluciones (Tseng et al., 2005). En Colombia, el transporte ocupa un 35,2% de la cantidad en los costos logísticos influyendo enormemente en el desempeño del sistema logístico (Departamento Nacional de Planeación, 2018), por lo cual se requiere evaluar estrategias para disminuir los costos y mejorar la competitividad del país.

2.4 Sistemas de transporte de carga

El transporte eficiente de mercancías es esencial para el buen funcionamiento de las redes de transporte urbano, que a su vez son importantes para satisfacer las necesidades de las empresas y los residentes de la ciudad. Proporcionar un transporte de carga eficiente es, por lo tanto, una dimensión importante del desarrollo urbano, esencial para mantener la prosperidad y la habitabilidad de las ciudades (Cui et al., 2015).

El transporte eficiente de mercancías es esencial para la economía urbana, ya que reduce los costos del comercio y mejora el acceso a una amplia gama de bienes para productores y consumidores. Para entender las dinámicas de operación entre proveedores, transportadores y receptores de carga, es necesario definir el concepto de los sistemas de transporte de carga. Holguín-Veras y Sánchez (2016) los definen como la colección de elementos (equipos, infraestructura, mano de obra) que participan en el movimiento de la

carga y mencionan que algunos de estos sistemas tienen una ubicación establecida (carreteras, bodegas, estacionamientos) y otros, como las compañías transportadoras y los vehículos en sí mismos no están limitados a un área específica. Se resalta que estos sistemas de transporte varían teniendo en cuenta particularidades de cada región geográfica (política pública, normas, estilos de gobierno, tecnologías y rasgos sociales, demográficos y culturas de cada contexto).

En el mismo trabajo Holguín-Veras y Sánchez explican que los clientes de estos sistemas de transporte de carga son las cadenas de suministro que se encargan de la producción, manufactura, transporte, almacenamiento y distribución de bienes a los consumidores, que corresponderían a los elementos de la demanda, receptores de carga. Las interacciones entre los actores que intervienen en estos procesos (Ver Tabla 1), son la clave para entender las reacciones de los generadores, transportadores y receptores de carga ante estrategias que modifiquen la operación (Holguín-Veras & Sánchez-Díaz, 2016) como el cambiar las entregas de mercancías a horarios nocturnos.

Luego de identificar los elementos que componen un sistema de transporte de carga, se debe mencionar que la utilización de recursos (personal, equipos, vehículos, energía, infraestructura) necesarios para suplir las necesidades de abastecimiento de las ciudades, traen consigo ciertas externalidades que son en principio inherentes a la operación: congestión, contaminación, accidentes de tránsito, altos niveles de ruido y daños a la infraestructura, pero que, al ser una actividades necesarias, es crucial maximizar la productividad económica y la eficiencia a la vez que minimizar las externalidades negativas para alcanzar las metas de económicas y ambientales de las ciudades (Holguín-Veras et al., 2016).

Tabla 1. Stakeholders involucrados en sistema de transporte de carga

Mercados que constituyen la demanda de transporte de carga		Stakeholder	Objetivo del Stakeholder
Bienes	Demanda de bienes	Receptor	Adquisición de bienes favorecidos a costos mínimos que cumplan con los requisitos
	Abastecimiento de bienes	Generador	La satisfacción de las necesidades del cliente mediante la entrega del bien
Transporte	Demanda de transporte		

			a un costo mínimo que cumpla los requisitos
	Abastecimiento de transporte	Transportista	Satisfacer las necesidades del cliente transportando el bien a un costo mínimo que cumpla con los requisitos
	Demanda de tráfico		
Tráfico	Abastecimiento de tráfico	Operador de infraestructura	Provisión de un sistema de tráfico eficiente a costos mínimos
		Autoridades	Provisión de un sistema de tráfico eficiente considerando los requisitos económicos, ecológicos y sociales

Fuente: Tomado y adaptado de (Rühl & Boltze, 2016)

A partir de lo anterior, existe un consenso cuando se dice que un sistema urbano de carga eficiente es esencial para el buen funcionamiento de las ciudades modernas, la calidad de vida de los ciudadanos y la economía que la soporta (Holgúin-Veras et al., 2016). Así, Taniguchi (2012) resalta la necesidad de utilizar sistemas de transporte de carga eficientes y efectivos en términos de costos logísticos teniendo siempre en consideración sus impactos en términos ambientales y de seguridad para los ciudadanos.

Más allá de la importancia del transporte de carga urbano para el funcionamiento y el desarrollo de la economía urbana, también se ha prestado atención a las externalidades ambientales negativas del transporte de carga en las ciudades. Los impactos sociales y ambientales negativos comúnmente observados incluyen congestión, choques que involucran camiones, contaminación del aire local, intrusión visual, efectos de barrera, ruido y uso de energía, así como emisiones (Anderson et al., 2005).

Los movimientos de carga también aumentan las emisiones totales del sector del transporte. Dado el tamaño del vehículo y las fuentes de combustible a menudo involucradas, la carga relacionada con el comercio ha sido reconocida como un importante contribuyente a la contaminación del aire urbano. Por lo tanto, si bien las operaciones de transporte urbano de mercancías constituyen una proporción menor del tráfico por carretera en las ciudades, son uno de los principales emisores de contaminantes del transporte. De esta forma, las evidentes ventajas y limitaciones que se encuentran al distribuir las operaciones de transporte de carga en las ciudades a lo largo del día han impulsado una corriente de investigación enfocada a encontrar maneras de reducir la

demanda de transporte o mover una porción de ella fuera de las horas pico. Estas técnicas han sido referidas como Gestión de la Demanda de Transporte (Holguín-Veras et al., 2008).

2.5 Gestión de la Demanda de Transporte

Actualmente, la Gestión de la Demanda de Transporte (TDM) es una pieza central de las políticas públicas en todo el mundo, especialmente en las grandes ciudades. Como las ubicaciones de la oferta y la demanda de un bien generalmente difieren, se requiere un movimiento de mercancías en la infraestructura de tráfico. El transporte de carga está constituido por la totalidad de todos los movimientos de mercancías. Por lo tanto, la demanda de transporte de carga es una demanda derivada. En consecuencia, influir en la demanda de transporte de carga requiere la identificación de las fuerzas impulsoras, que inducen los flujos de mercancías y, por lo tanto, el transporte de carga.

Aunque el transporte de mercancías contribuye en gran medida a preservar la prosperidad económica y competitividad de las ciudades, los impactos negativos de su fuerte crecimiento son cada vez más evidentes. Los costos ambientales y sociales de la congestión como la contaminación del aire y el ruido, el agotamiento de la energía, las bajas en las carreteras y los retrasos diarios llevan a los responsables de las políticas urbanas a implementar políticas de TDM. Habibian y Kermanshah (2011) definen este concepto en términos generales como las estrategias cuya implementación buscan lograr el uso eficiente de los recursos de transporte.

Este tipo de iniciativas busca reducir el número de viajes que se realizan para suplir la demanda de entregas en la ciudad, tienen un alto impacto porque suprimen parcialmente el requerimiento promedio de transporte, reduciendo así los costos inherentes a la operación. No son aplicables en todos los escenarios debido a que existen bienes que por sus características son críticos para el abastecimiento de la ciudad y reducir la cantidad de viajes de distribución podría no ser viable; sin embargo dentro del basto número de entregas de mercancías que se generan en las ciudades existe un gran potencial para la reducción sin impactar negativamente la rentabilidad de los proveedores, más aún, hay significativas oportunidades de reducir el número de vehículos que llegan a una zona de la ciudad coordinando las compras entre las empresas cercanas.

Ha habido numerosas iniciativas en toda Europa destinadas a frenar los impactos negativos del transporte de mercancías mediante el aumento de la eficiencia de los procesos de entrega o la promoción de la cooperación entre las autoridades y las empresas. Aunque su eficacia ha sido probada, estas iniciativas son la excepción y no la regla todavía. Para proteger a los residentes, los encargados de la toma de decisiones en las autoridades de transporte aún contrarrestan los problemas cada vez mayores aplicando medidas restrictivas como las prohibiciones nocturnas de camiones (Rühl & Boltze, 2016). Aunque tales medidas restrictivas pueden lograr sus objetivos, por ejemplo, cumpliendo los objetivos de reducción de emisiones, todavía no se consideran los impactos de tales medidas restrictivas en el transporte de mercancías y los conceptos estrechamente relacionados de producción, logística y venta minorista.

Para Anderson *et al.* (2005) las empresas pueden ayudar a detener los impactos relacionados con el crecimiento del transporte de carga. De acuerdo con su trabajo, las partes interesadas en la gestión de la demanda de transporte de carga pueden obtener simultáneamente un beneficio financiero directo o indirecto al iniciar e implementar medidas como entregas conjuntas, conducción eficiente o un cambio de transporte a las horas de menor actividad. Rühl y Boltze (2016) destacan en su trabajo cinco (5) medidas para realizar la medición de la gestión de la demanda del transporte y el desempeño logístico de la cadena de suministro en términos de transporte:

- Reducción del nivel de tráfico (vehículos * km), cuyo objetivo es mejorar el nivel del tráfico
- Desplazamiento espacial del tráfico, cuyo objetivo es influir en la elección del origen y el destino del transporte de mercancías para mejorar su rendimiento
- Cambio temporal del tráfico (veh / h), cuyo objetivo es cambiar la dispersión temporal del volumen de tráfico
- Cambio modal del tráfico (%), cuyo objetivo es cambiar la división modal
- Control de tráfico, cuyo objetivo es establecer un manejo eficiente de tráfico bajo consideración de varios parámetros tales como flujo de tráfico o indicadores ambientales

2.5.1 Medidas para reducción de tráfico

Los planificadores de tráfico tienen varias medidas para reducir el tráfico. Entre otros, pueden usar instrumentos de planificación para influir en la generación del viaje. Una medida establecida es la designación de áreas de fácil acceso, por ejemplo, con conexión directa a la red de autopistas, para negocios de carga intensiva de receptores, distribuidores o transportistas. De esta manera, los viajes a través de las áreas habitables y, por lo tanto, los impedimentos para los residentes pueden ser limitados (Taniguchi et al., 2012).

Las regulaciones legalmente vinculantes con respecto a los espacios de estacionamiento en los planes de uso de la tierra evitan las molestias del tráfico debido a los vehículos de entrega (Beutel et al., 2015). Del mismo modo, las ciudades pueden usar sus planes de desarrollo de transporte para influir en el transporte de carga definiendo los objetivos y estrategias correspondientes para su política de tráfico. Por lo tanto, existe la posibilidad de integrar estrategias sostenibles de transporte de carga con consenso general como principios para la planificación e implementación de medidas de transporte de carga.

Otra idea innovadora es la limitación del volumen de tráfico mediante presupuestos de movilidad para receptores y distribuidores en áreas urbanas. Estos presupuestos solo permiten una cantidad limitada de viajes propios, así como viajes de proveedores de servicios gratuitos por año. Los viajes adicionales requieren certificados cobrados (Torrentellé & Moraiti, 2012). A nivel nacional, los instrumentos fiscales como el impuesto al aceite mineral o el impuesto a los vehículos de motor se prueban y se confía en ellos para influir en los costos de transporte.

Un instrumento bien establecido es la promoción de la cooperación de los transportistas. Se esfuerza por reducir el volumen de tráfico mediante la agrupación de transporte o el uso compartido de la infraestructura logística. Entre otras, incluye la iniciativa asociada a realizar entregas conjuntas o la operación de centros de consolidación urbanos y suburbanos (Quak, 2008).

2.5.2 Medidas para el cambio espacial de tráfico

Contrariamente a las numerosas medidas para la reducción del tráfico, solo hay unas pocas medidas para influir en la elección del destino de la carga ya que el receptor lo

determina significativamente con su decisión de abastecimiento. Por lo tanto, la colaboración entre empresas ubicadas en la misma región debe fomentarse con la promoción de la cooperación empresarial en forma de iniciativas de clúster o la organización de ferias comerciales para que los productos se obtengan más regionalmente que globalmente. Sin embargo, una cooperación regional más fuerte puede conducir a mayores exportaciones (Taniguchi et al., 2012).

Otra iniciativa consiste en la carga consolidada a través de la implementación de logística colaborativa. La consolidación de carga en su origen busca maximizar la eficiencia de una cadena de suministro individualmente, a través de dar un mejor uso a sus activos, la consolidación enfocada al destino combina carga desde diferentes proveedores relacionados con uno (o varios adyacentes) destinatarios, con la intención de reducir el tráfico de vehículos de carga, en un modo similar a los servicios de paquetería. De esta forma, el tráfico puede ser reducido sin necesariamente cambiar el número de entregas ordenadas por un establecimiento en particular.

La reducción del número de vehículos que arriban a un punto de demanda se puede lograr desde diferentes enfoques, centrando la atención en el eslabón de la cadena que lidera la consolidación, proveedores, transportadores o receptores de carga.

La consolidación en origen o liderada por el proveedor es parte de las operaciones rutinarias para las cadenas de suministros, al buscar la mayor eficiencia en la utilización de los recursos. Sin embargo a pesar de los esfuerzos el nivel de utilización de los vehículos permanece por debajo del 40% (MinTransporte, 2019), este fenómeno puede ser consecuencia de la sobreoferta de vehículos y los altos niveles de competencia de los mercados, que sumados a la contribución del e-commerce (que requieren envíos rápidos que no necesariamente conducen a consolidación) crean un efecto combinado que produce grandes externalidades negativas. (Holguín-Veras & Sánchez-Díaz, 2016)

La consolidación liderada por el transportador, especialmente en las áreas urbanas se relaciona estrechamente con la utilización de Centros de Consolidación Urbanos (CCU), infraestructura diseñada para reducir la cantidad de tráfico de carga a una parte congestionada de la ciudad. En la teoría, los CCU generan beneficios a las áreas urbanas sensibles a la congestión (Browne et al., n.d.), sin embargo su implementación real se ha visto afectada por varios factores, entre los que se incluyen la falta de espacio para su

construcción cerca de las zonas que buscan atender, la necesidad de una vinculación extensiva de proveedores en su financiación (o en su defecto, la financiación estatal) y la resistencia por parte de los proveedores ante la necesidad de entregar control sobre sus entregas, perder tiempo de contacto con sus clientes y perder la oportunidad de usar su propia flota de vehículos para dar a conocer su marca que implicaría hacer uso de un CCU (Allen, Browne, Woodburn, & Leonardi, 2012; Browne et al.; Doig, 2001).

Por su parte, las iniciativas de consolidación en destino o lideradas por el receptor, buscan aprovechar el poder de los demandantes de carga para incentivar la consolidación de carga en varias cadenas de suministro a la vez. La reducción del número de entregas, se puede generar a través de limitar el número de proveedores (Transport for London, 2013) o incentivar el uso de CCU por los proveedores ya existentes trayendo consigo múltiples beneficios: los receptores reducen el número de interrupciones en su actividad producidas por la recepción de suministros, los proveedores se benefician del incremento en la eficiencia de los recursos y la ciudad tiene una menor cantidad de vehículos en circulación.

La formulación de Planes de entregas para las empresas ubicadas en las zonas congestionadas agrupa proveedores que prestan servicios similares, agrupando entregas de uno o varios proveedores, disminuyendo la frecuencia de las órdenes e implementando compras colaborativas entre empresas del mismo sector. Esto permite a los proveedores seleccionados, atender más clientes usando el mismo número de vehículos para las entregas. La implementación de planes de entregas en la ciudad de Londres sugiere que la reducción en el número de entregas puede alcanzarse y oscila entre un 20% y un 40% para locaciones individuales en donde se implemente; sin embargo, los beneficios de estas estrategias a gran escala en las ciudades aún no han sido cuantificados (Holguín-Veras & Sánchez-Díaz, 2016).

2.5.3 Medidas para el cambio modal de tráfico

Influir en la elección modal en el transporte de mercancías, en particular el traslado de los transportes de mercancías a los ferrocarriles es un objetivo de larga data de la política de transporte. Las normas de emisión o seguridad aseguran una modernización frecuente de la flota y las restricciones de manejo dependientes del vehículo con respecto al tipo, peso, tamaño, clase de emisión o factor de carga del vehículo son muy comunes. Si bien las restricciones dependientes de la clase de emisión, como la zona ambiental, se dirigen

principalmente a la modernización de la flota, las restricciones que dependen del tamaño del vehículo se aplican, por ejemplo, para vehículos de entrega en centros históricos de las ciudades con calles estrechas (Quak, 2008).

La modernización de la flota también puede fomentarse con apoyo financiero a través de programas de apoyo para vehículos centrados en la modificación del vehículo o la modernización de la flota. La promoción de vehículos de transporte alternativos, como vehículos eléctricos o tranvías, contribuye al cambio modal. Aunque los receptores y los generadores están motivados para utilizar vehículos de transporte sostenibles, estos programas de promoción financiera para infraestructura tienen poco éxito en la actualidad (Dablanc et al., 2013).

2.5.4 Medidas para el control de tráfico

Las medidas para influir en la elección de ruta y el comportamiento de conducción son parte de la gestión del suministro de tráfico; sin embargo, también influyen en la demanda de tráfico. Las iniciativas para el control del tráfico incluyen restricciones de conducción espacial, como prohibiciones de camiones para el tránsito, regulaciones de estacionamiento diferenciadas por tiempo y espacio (por ejemplo, zonas de carga / descarga) así como esquemas de precios de carreteras espacialmente diferenciados (Quak, 2008).

Un buen ejemplo de ello son las reducciones de peajes de vehículos pesados (HGV, por su sigla en inglés) para autopistas menos sensibles al ruido en Japón, por lo que se puede lograr un alivio significativo para las rutas alternativas sensibles al ruido (Mason & Lalwani, 2006). La optimización de la ruta de los transportistas se mejora con la implementación de rutas de camiones o sistemas de información y orientación (Dablanc et al., 2013). Aunque todavía son muy raras las priorizaciones de camiones en las intersecciones señalizadas o la designación de carriles exclusivos para camiones, la implementación de tales medidas puede reducir el número de paradas, emisiones y tiempos de viaje.

2.5.5 Medidas para el cambio temporal de tráfico

Influir en la elección del tiempo para evitar la congestión y limitar la contaminación ambiental es importante tanto para el transporte de pasajeros como para el transporte de

carga. Para este propósito, particularmente las prohibiciones temporales de vehículos entran en uso, incluyendo las prohibiciones temporales de camiones, como la prohibición de los vehículos en eventos feriados, las prohibiciones nocturnas de camiones que se implementan en muchas ciudades del mundo debido a razones ambientales o las prohibiciones diurnas de camiones en las megaciudades que se implementan debido a limitaciones de capacidad.

Otro instrumento apropiado es la flexibilización de las ventanas existentes o la implementación de plazos de entrega. Las ventanas de entrega ya están en uso para muchas zonas peatonales para cambiar las entregas a las horas de menor actividad (Holguín-Veras et al., 2011). Esta alternativa busca cambiar los horarios de distribución de mercancías a horarios menos congestionados (normalmente los horarios nocturnos). En estos sistemas el número total de arribos vehiculares a cada punto de demanda no necesariamente debe ser modificado. Debido a que esta iniciativa busca inducir cambios en el modo de operación, es una decisión compleja al ser el receptor de carga quien decide el tamaño de la orden y el transportador quien debe adaptarse a estos requerimientos. El cambio en los modos no es siempre posible por razones económicas y de disponibilidad, y puede llegar a generar ineficiencias y sobrecostos a lo largo de la cadena de suministro, especialmente si se lleva a cabo bajo una política de obligatoriedad.

Teniendo en cuenta que, de acuerdo con los pilotos y trabajos de investigación existentes en la literatura, cerca del 32% de los receptores de carga están dispuestos a permitir a su proveedor entregar las mercancías en supervisión en horarios fuera de la operación (Luis et al., 2015), esta alternativa minimizaría los sobrecostos de personal que recibir en horarios nocturnos implica para quien recibe.

Con base en lo presentado anteriormente, el cargue y descargue nocturno de mercancías representa así una de las alternativas que mayor impacto positivo tiene en el mejoramiento del desempeño logístico, ambiental y la movilidad urbana. Aun cuando existen limitaciones para la implementación de la medida, especialmente del lado de los receptores (Brom et al., 2011; Holguín-Veras et al., 2011; Holguín-Veras & Aros-Vera, 2014), existen hallazgos presentados por otros autores (Holguín-Veras et al., 2008) quienes señalan que son los receptores de carga, en virtud de ser el eslabón final en esa cadena, quienes tienen el potencial de influir en las decisiones que los generadores y transportadores de carga toman.

2.6 Cargue y Descargue Nocturno

Es evidente que las ciudades densamente pobladas, sufren el problema de tener una infraestructura sobresaturada durante las horas del día, pero subutilizada en las noches y primeras horas antes del amanecer (Sánchez-Díaz et al., 2017). Las franjas horarias subutilizadas han sido comúnmente denominadas Off-Peak hours (OPH) pero no existe un consenso en la literatura acerca del horario específico al que se refieren, especialmente debido a que las horas con altas demandas de ocupación de infraestructura (vías, aceras o espacios de carga) son variables de ciudad a ciudad. Para ilustrar esto, en NY City se considera OPH el horario comprendido entre las 19:00 y las 6:00 (Holguin-Veras et al., 2013) y en Paris de 22:00 a 5:00 (Club décibel villes, 2013).

Implementar operaciones de Cargue y Descargue Nocturno consiste en establecer restricciones horarias para la distribución y entrega de mercancías, así como para buena parte del transporte de carga, de manera que se realicen en horarios nocturnos. En una ciudad como Bogotá D.C., donde las horas pico en tráfico pueden llegar hasta las 20:00, se podrían implementar operaciones en ventanas de tiempo entre las 21:00 y las 5:00 o entre las 22:00 y las 6:00. Así, una política de Cargue y Descargue nocturno tiene como propósito hacer una especie de segmentación o separación de los tipos de vehículo y de tráfico que circulan por la ciudad, de manera que los vehículos particulares y de transporte de pasajeros no interfieran con los vehículos de transporte de carga y sus operaciones. Su implementación tendría un impacto notorio en materia de movilidad, además de implicaciones positivas a nivel ambiental y de seguridad.

Con respecto a la implementación, la revisión de literatura permite identificar varios tipos de estrategias para promover el cambio de horario en las operaciones, estas estrategias o enfoques pueden ser influenciados por las prácticas tradicionales de los actores en cada ciudad, su voluntad de participación, su actitud ante la regulación, la naturaleza de sus relaciones y el marco legal aplicable (Sánchez-Díaz et al., 2017).

La estrategia no intervencionista asume que el mercado de demanda de carga encuentra la mejor opción posible por sí mismo y no necesita intervención por parte del sector público, algunos sectores aún en contextos como el de Bogotá, realizan sus operaciones durante las horas de la noche, la distribuidora de cerveza Bavaria S.A. realiza el cargue de los vehículos en horario nocturno, así mismo, la recolección de basuras en la ciudad se hace de noche. A pesar de esto, existe evidencia que indica que sin un programa establecido,

el porcentaje de empresas que realizarían el cambio es demasiado pequeño para realmente generar impactos positivos observables en movilidad (Vilain & Wolfrom, 2000) (Allen et al., 2008).

La estrategia de fijación de precios por carretera requiere de una intervención moderada del sector público, para impulsar la implementación de la práctica, propone que al cobrar una tarifa por la utilización de las vías durante las horas pico, las empresas se verán obligadas a gestionar sus demandas de carga y movilizarlas a un horario en donde no representen un sobrecosto. Sin embargo, en la literatura existen evidencias que sugieren que el efecto no siempre es el esperado (de Palma et al., 2005) (Holguín-Veras, Ozbay, et al., 2005).

De manera similar a los cobros por utilización de la vía pública, la estrategia de incentivos para la participación voluntaria se basa en proveer un incentivo económico para cambiar el horario de las operaciones, pero en lugar de penalizar a quien congestione las vías, incentiva al receptor de carga que esté dispuesto a establecer sus horarios de atención en horarios nocturnos. Así, se crea una nueva ventana de atención a la oferta de carga, que puede ser aprovechada para distribuir las operaciones diarias.

Esta alternativa considera la dificultad de las empresas receptoras de carga para invertir en las soluciones de seguridad, tecnologías y mano de obra que la recepción nocturna exige (Holguín-Veras & Aros-Vera, 2014) (Holguín-Veras & Aros-Vera, 2015) (Silas et al., 2012) (Insti- et al., n.d.) (Holguín-Veras et al., 2017).

Otras implicaciones de esta alternativa tienen que ver con las emisiones contaminantes de los vehículos que realizan las operaciones de transporte en la ciudad. Los impactos directos del cambio de horario para la realización de entregas en grandes ciudades fueron estimados por Holguín-Veras, Encarnación, *et al.* (2016) que analizando los datos recolectados en tres ciudades (Bogotá, Sao Pablo y New York City) concluyeron que las operaciones nocturnas de entregas de mercancías podían alcanzar hasta un 65% en términos de reducción de emisiones de PM10 y PM25, lo que representaría anualmente, alrededor de 2500 toneladas menos de estos contaminantes en áreas metropolitanas de entre 10 y 15 millones de habitantes.

Las anteriores alternativas de gestión de la demanda de transporte de carga, brindan un amplio panorama para la investigación de estrategias que, al ser aplicadas, lleven a un

mejoramiento en la eficiencia de las operaciones logísticas realizadas en zonas urbanas congestionadas, generando beneficios económicos para las empresas y una reducción de las externalidades negativas para los habitantes de la ciudad.

2.7 Simulación basada en agentes

La eficiencia de las actividades de logística de la ciudad se ve afectada debido a las preferencias personales en conflicto y la toma de decisiones distribuidas por parte de múltiples partes interesadas en la logística de la ciudad. Esto se ve exacerbado por la interdependencia de las actividades logísticas de la ciudad, la toma de decisiones con información limitada y la preferencia de los interesados por objetivos personales sobre la eficiencia del sistema. En consecuencia, la clave para comprender las causas de la ineficiencia en el dominio logístico de la ciudad es comprender la interacción entre las partes interesadas heterogéneas del sistema.

Con la capacidad de representar un sistema de forma natural y flexible, el modelado basado en agentes (ABM) es una alternativa prometedora para el dominio logístico de la ciudad. Los modelos de múltiples agentes a menudo se utilizan para representar el comportamiento de las partes interesadas y evaluar las medidas políticas en términos de impactos económicos, financieros, sociales, ambientales y energéticos basados en la estimación de los efectos de las políticas a implementar (Taniguchi et al., 2016).

Una característica clave del dominio de la movilidad urbana es el alto número de partes interesadas y, especialmente en lo que respecta al transporte de mercancías, la heterogeneidad de los actores a lo largo de las diferentes cadenas de suministro que distribuyen sus productos a los clientes finales. Los diferentes roles generan diferentes tipos de necesidades e intereses para cada grupo de partes interesadas. Por lo tanto, cada grupo tiene procesos particulares de toma de decisiones (Boerkamps et al., 2000). En consecuencia, existe una gran necesidad de un enfoque sistemático y analítico para comprender la toma de decisiones entre los diferentes interesados a fin de comprender la movilidad de carga urbana y de pasajeros.

Los modelos basados en agentes (ABM, por sus siglas en inglés) permiten adjuntar diferentes características, procesos de decisión y objetivos a cada agente o grupo de agentes. Los ABM ofrecen la ventaja del modelado ascendente (Hmida et al., 2012). El

investigador da forma a los agentes con reglas de comportamiento heterogéneas, objetivos que deben alcanzarse y criterios para los niveles de satisfacción. Los agentes se integran en redes y esto influye en sus acciones. Al modelar componentes en lugar de todo el sistema, la estructura del sistema no está predefinida y se pueden observar las propiedades emergentes.

Además, al modificar las variables de interés, el modelador puede explorar diferentes tipos de escenarios (Zhao et al., 2019), por lo cual se pueden probar diferentes opciones para un sistema de transporte en un entorno simulado y pueden calibrarse con datos reales. Esto permite que ambos prueben *ex ante* el efecto de políticas potenciales, o para evaluar *ex post* el efecto de políticas reales que se han implementado en la realidad.

Taniguchi *et al.* (2012) señalaron que los enfoques basados en agentes son muy adecuados para la logística de carga como la resolución de problemas dinámicos de enrutamiento y programación de vehículos utilizando modelos de múltiples agentes. Por su parte, Donnelly *et al.* (2010) desarrollaron un modelo de múltiples agentes con micro simulación de flujos de carga que se aplicó en Portland, en el estado de Oregon, mientras que Tamagawa *et al.* (2010) analizaron la interacción entre generadores, transportistas, administradores y residentes utilizando modelos de múltiples agentes con aprendizaje de refuerzo para evaluar las medidas logísticas de la ciudad, y señalaron que las situaciones de beneficio mutuo para las partes interesadas son posibles mediante la implementación de restricciones de flujo de camiones y sistemas de entrega conjunta.

Roorda *et al.* (2010) presentaron un marco conceptual para el modelado de servicios logísticos basado en agentes representando la diversidad de roles y funciones que se presentan en la logística de carga urbana, cómo interactúan a través de los mercados y cómo las interacciones a largo y corto plazo entre los establecimientos comerciales se establecen en el mercado a través de contratos. Teo *et al.* (2014) utilizaron modelos de múltiples agentes para evaluar las medidas de política de logística en ciudades de Japón, incluidos los precios de las carreteras, los controles del factor de carga y la construcción de autopistas en las redes de carreteras urbanas y aclararon los efectos de los precios y la provisión de autopistas en la eficiencia de las operaciones de los vehículos y el CO₂, Emisiones de NO_x y SPM (material de partículas suspendidas) generadas por camiones.

Wangapisit *et al.* (2014) investigaron los sistemas de entrega conjunta con centros de distribución urbanos y gestión de estacionamiento utilizando modelos de múltiples agentes. Estos modelos permiten comprender el comportamiento de respuesta de las partes interesadas a las acciones tomadas por otros actores y los efectos de las medidas de política. Sin embargo, la validación de la simulación de múltiples agentes es un tema desafiante y se necesita más experiencia y estudios de casos de aplicación práctica de modelos de múltiples agentes.

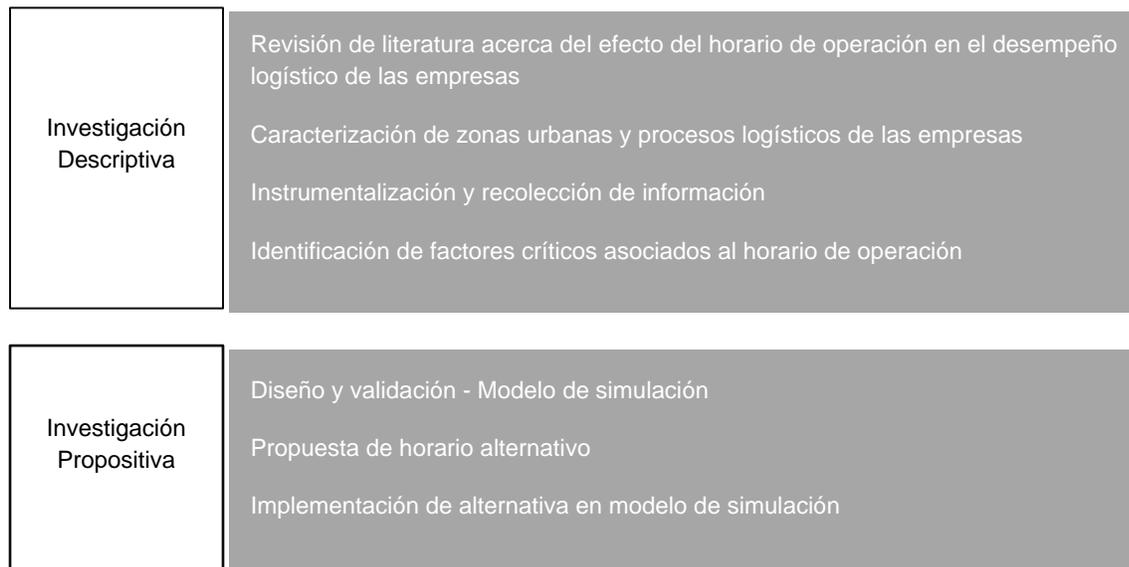
Recientemente, el papel del modelado basado en agentes para estudiar la logística de la ciudad y la movilidad de los pasajeros en las zonas urbanas es muy debatido en la literatura académica. Sin embargo, el énfasis dado a nivel teórico a las ventajas potenciales de este tipo de modelos aún no se ha traducido en una producción intensiva de modelos basados en agentes que aborden la movilidad urbana.

De esta manera, se presenta el estado del arte que soporta el trabajo de investigación, los aportes académicos a la investigación en logística urbana y las técnicas de simulación que se relacionan anteriormente, así como las experiencias nacionales e internacionales que se mencionan, hacen parte del contexto necesario para abordar la problemática de investigación y avanzar hacia la cuantificación de los posibles impactos relacionados al cambio de horario en las operaciones de cargue y descargue identificando los factores logísticos que se verían beneficiados con la implementación de esta alternativa a la movilización de mercancías en áreas urbanas.

3. Metodología de la investigación

Este trabajo es una investigación que se enmarca en un enfoque de tipo mixto (cuantitativo y cualitativo), definida en dos (2) fases principales: la investigación descriptiva y propositiva (Creswell, 2009). Con el objetivo de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se realiza en la primera fase una caracterización de las principales zonas congestionadas de la ciudad y las características que identifican a una zona congestionada como tal. En la segunda fase se desarrolla un modelo de simulación que busca representar el estado actual de las zonas e identificar el impacto del cambio de horario en la realización de actividades de abastecimiento y distribución en aquellas que presentan mayor congestión en Bogotá, finalizando con recomendaciones para la implementación de estas iniciativas en la ciudad.

Figura 5. Metodología de investigación



Fuente: Elaboración propia

3.1 Fase uno: Investigación descriptiva

El propósito de esta fase buscaba, a través de información primaria y secundaria, realizar la identificación de las características que corresponden con una zona que presenta un alto grado de congestión, así como las zonas de la ciudad que cumplen con dichas características, su estado actual, relaciones de origen destino de la carga, las partes interesadas y demás información relevante. La primera fase está compuesta por tres (3) etapas.

3.1.1 Instrumentación y recolección de información

En esta etapa se contempla la definición de fuentes primarias y secundarias para la construcción y aplicación de instrumentos de recopilación de información relacionada con la investigación. Se busca obtener información de tipo cualitativo y cuantitativo para identificar los elementos más relevantes necesarios para la construcción del modelo de simulación.

En primera instancia fue necesario realizar una contextualización sobre el problema a partir de la recopilación y análisis de información secundaria (revisión de literatura – estado del arte y de la práctica), con el fin de identificar la información requerida para realizar el diseño e implementación de los instrumentos de recolección de información. La información revisada está compuesta por reportes e informes presentados por entidades gubernamentales como la Secretaría de Movilidad de la ciudad y el Ministerio de Transporte, así como otros documentos de contexto a nivel nacional e internacional, así como papers científicos de los referentes mundiales.

Durante el desarrollo del estudio para la evaluación y propuesta de una regulación de circulación de vehículos de transporte de carga en Bogotá D.C., la firma consultora diseñó un formato de encuesta que fue aplicado a 430 actores de la logística local entre empresas generadoras, transportadoras y receptoras de carga. En este formato, se cuestionaba acerca de las características de su operación logística y de la flota de vehículos utilizada para su desarrollo. De este ejercicio, se recopiló información valiosa que es insumo de la investigación realizada en este documento. Como complemento, se diseñó y aplicó un instrumento de recopilación de información primaria enfocado a analizar el cambio en las operaciones en la situación disruptiva causada por las medidas de aislamiento puestas en

marcha durante el estado de emergencia causado por la pandemia de COVID19, en ambos casos se realizó un muestreo por conveniencia para la aplicación de los instrumentos teniendo en cuenta la disponibilidad y el acceso a las partes interesadas y demás actores involucrados.

Por otro lado, se incluyó como información secundaria una base de datos de origen destino de la carga dentro de la ciudad, generada por la Secretaría de Movilidad a partir de la encuesta de movilidad de 2018.

3.1.2 Caracterización de zonas urbanas y procesos logísticos

Esta etapa contempla el análisis inicial de las zonas de la ciudad bajo estudio, evidenciando las características claves que identifican una zona congestionada como tal, realizando el diagnóstico de la situación actual de distribución y recepción de carga, y considerando el contexto de la operación logística en las zonas en las que se encuentran las empresas, y determinando los actores, factores intervinientes, variables y limitantes de la investigación.

Así mismo se identifican los actores objeto de estudio y las características de sus sistemas logísticos, las plataformas estratégicas de las organizaciones y los macro procesos de operación, apoyo y control identificando así los indicadores claves de desempeño y los sistemas de medición y control que actualmente se utilizan.

3.1.3 Identificación de factores críticos asociados al horario de operación

A partir de la depuración y análisis de la información primaria obtenida en los instrumentos de recopilación de información y la información secundaria recopilada en la etapa uno de esta investigación, se identifican los factores críticos asociados con el horario de operación que se tiene en las zonas congestionadas de la ciudad, y se definen los indicadores a evaluar en los dos (2) escenarios de operación de las zonas congestionadas en la ciudad propuestos en la fase dos: el estado actual y el estado ideal.

3.2 Fase dos: Investigación propositiva

La fase dos de esta investigación está compuesta por tres (3) etapas: En primera instancia se diseña el modelo de simulación del estado inicial o actual de la operación en las zonas congestionadas de la ciudad, con base en la información primaria y secundaria obtenida en la fase uno de la investigación, incluyendo las características identificadas en sus sistemas logísticos. En la segunda etapa se presenta una propuesta de horario alternativo para la realización de las operaciones de abastecimiento en las zonas bajo estudio, estableciendo las condiciones en las cuales debería implementarse para dar respuesta a la problemática principal. En la tercera etapa se evalúa el impacto del cambio de horario en la operación de las zonas estudiadas a partir de la implementación del horario alternativo en el modelo de simulación inicial, generando conclusiones y recomendaciones para estudios futuros dentro de esta línea.

3.2.1 Simulación basada en agentes – Diseño y validación

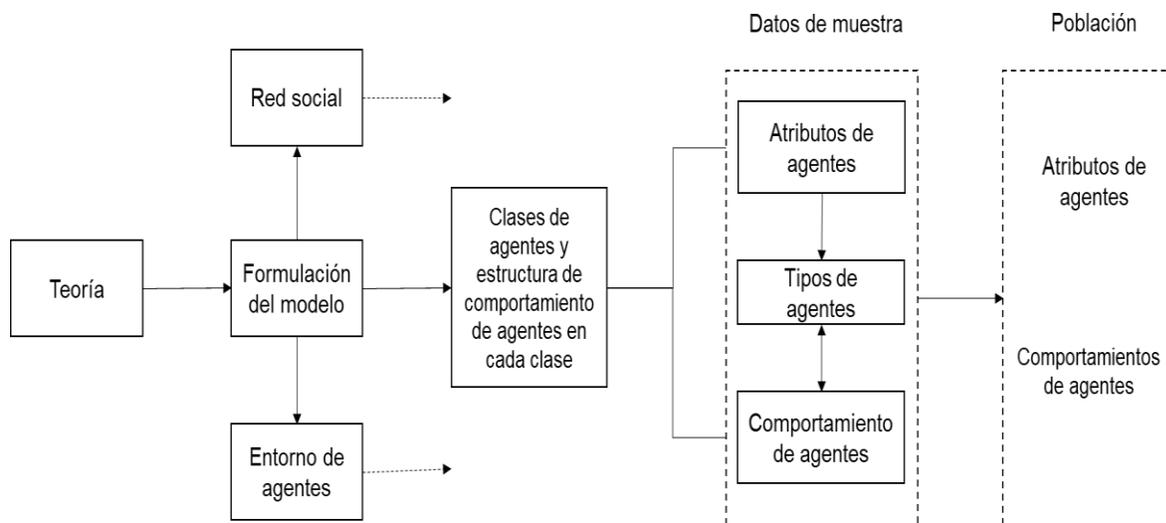
Entre los investigadores, existe un creciente interés en conceptualizar problemas complejos. Requiere usar un marco de sistema y usar herramientas de modelado de sistemas para explorar cómo interactúan los componentes de un problema complejo. En particular, los enfoques de simulación del sistema son herramientas útiles para comprender los procesos y las estructuras involucradas en problemas complejos.

Una herramienta que tiene un uso extenso entre los investigadores es el modelado basado en agentes (ABM). Define los rasgos y las reglas de comportamiento iniciales de un agente que organiza sus acciones e interacciones. El modelado basado en agentes se centra en los componentes activos individuales de un sistema. Esto contrasta tanto con el enfoque de dinámica de sistema más abstracto como con el método de evento discreto centrado en el proceso.

Con el modelado basado en agentes, las entidades activas, conocidas como agentes, deben identificarse y definirse su comportamiento. Pueden ser personas, hogares, vehículos, equipos, productos o empresas, lo que sea relevante para el sistema. Se establecen conexiones entre ellos, se establecen variables ambientales y se ejecutan simulaciones. La dinámica global del sistema surge entonces de las interacciones de los muchos comportamientos individuales.

La metodología seleccionada para realizar el diseño del modelo basado en agentes es la de tipo inductivo, en la cual, de acuerdo con Smajgl Y Barreteau (2014), la caracterización y parametrización de los agentes y sus relaciones para integrarlos al modelo de simulación de forma exitosa, buscando siempre representar en la mejor forma posible el evento de la vida real bajo estudio. Esta metodología – llamada metodología CAP – busca identificar las características principales de los agentes involucrados en el modelo, las relaciones que se encuentran establecidas entre los agentes y los comportamientos emergentes a partir de dichas relaciones (Ver Figura 6).

Figura 6. Metodología de Caracterización y Parametrización CAP



Adaptación de (Smajgl & Barreteau, 2014)

En el marco de esta investigación, esta etapa de la fase dos se desarrolla en dos momentos. El primero corresponde a la simulación de la operación actual de las zonas bajo estudio en la ciudad, evidenciando las características de los agentes, sus relaciones y comportamientos individuales y colectivos emergentes a partir de dichas interacciones. En este escenario se pretende representar la situación crítica de congestión en las zonas estudiadas y cómo afectan la operación actual. El segundo momento incluye la validación del modelo y su ajuste según aplique, de acuerdo con la correspondencia del modelo con la realidad. El modelo será desarrollado en Python, por tratarse de un lenguaje multiparadigma, dinámico y multiplataforma, ofrece la versatilidad necesaria para implementar el modelo esperado y al poseer una licencia de código abierto es de fácil acceso y cuenta con el soporte de una nutrida comunidad de desarrolladores.

3.2.2 Propuesta de horario alternativo para la realización de las operaciones de abastecimiento y distribución

Con base en la revisión de literatura realizada, los estudios de caso evidenciados a nivel nacional e internacional y otra documentación pertinente, se propone una iniciativa de horario alternativo para la ejecución de operaciones de abastecimiento y distribución en las zonas con congestión en la ciudad, y se describen las condiciones y particularidades a tener en cuenta para lograr su implementación de forma exitosa, teniendo en cuenta las características de los actores involucrados en la operación. Así mismo, se presentan las ventajas y beneficios que pueden alcanzarse con la implementación de esta iniciativa en términos logísticos y de desempeño a nivel organizacional.

3.2.3 Implementación de horario alternativo en el modelo

Esta etapa busca implementar la iniciativa de horario alternativo para la operación de carga en las zonas bajo estudio en el modelo de simulación. Una vez evaluados los indicadores de desempeño en dicho modelo, se realiza el análisis de las incidencias en el desempeño logístico que resultarían de la implementación de esta iniciativa en las zonas definidas.

Con los resultados del modelo, se construirá un plan de intervención, en el que se tengan en cuenta los parámetros de entrada del modelo de simulación, y el análisis de sensibilidad de las salidas del mismo, incluyendo los factores clave para la implementación de la propuesta de cambio de horario, los roles de los actores involucrados, los costos de su implementación y los principales obstáculos a superar.

A partir del análisis de resultados y sumado a una revisión de las experiencias nacionales e internacionales, se lleva a cabo la identificación de factores claves de éxito para la implementación de la iniciativa de horario alternativo considerando el contexto particular de las zonas de la ciudad y las características de las operaciones de las empresas participantes.

4. Operaciones de abastecimiento en zonas congestionadas de la ciudad de Bogotá

La movilidad es un tema crítico en Bogotá debido a la generación de impactos en la calidad del aire, el uso del tiempo y la accidentalidad, afectando la competitividad de la ciudad. El aumento de la población y el aumento del parque automotor como consecuencia de las falencias del servicio de transporte público masivo, traen como consecuencia un incremento de esta problemática, afectando particularmente al transporte de carga.

En el año 2018, el 49% de las importaciones del país se concentraron en la ciudad de Bogotá, representando USD \$25.184 millones de dólares (Secretaría Distrital de Desarrollo Económico, 2019), y evidenciando la importancia de un abastecimiento permanente del mercado mayorista y minorista en la ciudad. Al ser limitado el espacio en la ciudad que puede dedicarse para el almacenamiento de grandes inventarios, diariamente se movilizan más de 28.000 vehículos de carga por los 9 accesos viales en la ciudad (Secretaría Distrital de Movilidad, 2019), trayendo consigo altos niveles de congestión que ralentizan la movilidad urbana.

En este capítulo se presentan inicialmente las generalidades de las zonas congestionadas en la ciudad; posteriormente se describen aspectos relacionados con la generación de viajes y con el abastecimiento en la ciudad; y finalmente se destacan las problemáticas identificadas que se relacionan con el horario de operación para el transporte de carga en Bogotá.

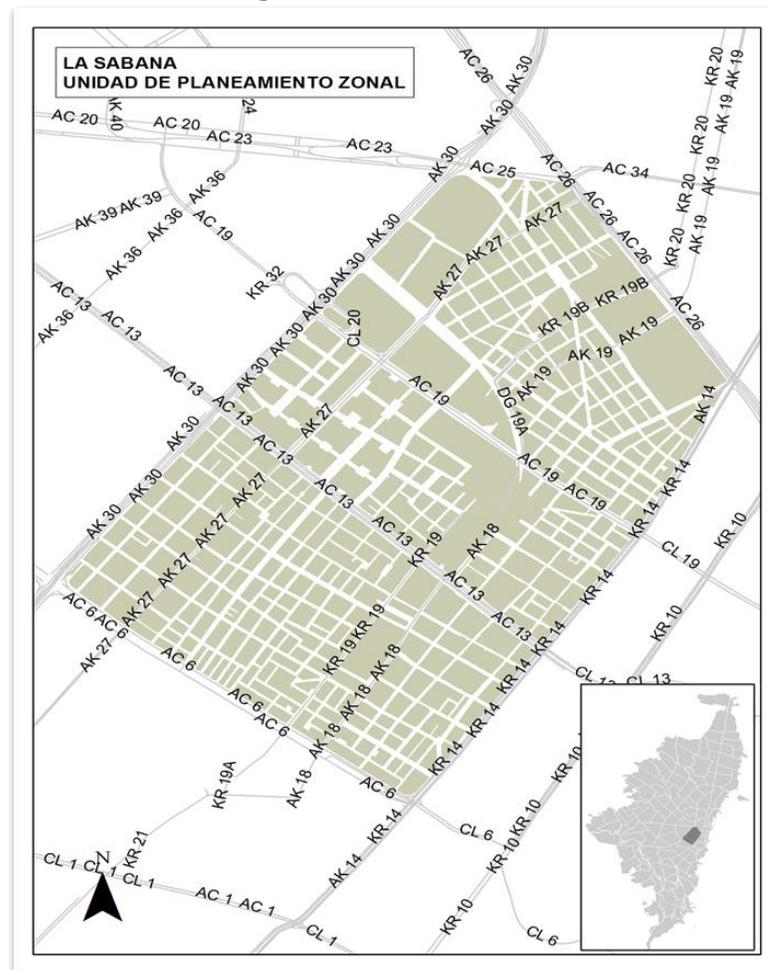
4.1 Generalidades

Las Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ) son “instrumentos de planeamiento que establecen la reglamentación urbanística para un conjunto de barrios que presentan características comunes en su desarrollo urbanístico, así como en sus usos y actividades

predominantes” (Cámara de Comercio de Bogotá, 2020a). Algunas de estas UPZ en la ciudad presentan alta densidad de operaciones logísticas, por cual poseen una alta circulación de vehículos, evidenciándose en ellas mayor congestión.

Bogotá se encuentra dividida en 70 UPZ. Las UPZ que se encuentran en la zona céntrica de la ciudad (La Sabana, Las Nieves y La Candelaria) presentan una vocación mayoritariamente comercial, por lo cual poseen una alta densidad de flujo peatonal y vehicular. La UPZ de La Sabana se encuentra ubicada en la zona norte de la localidad Los Mártires (ver Figura 7), y es un sector en el que predominan sitios de comercio y emblemáticos. De acuerdo con la Cámara de Comercio de Bogotá (2020b), esta UPZ atrae en promedio 614 viajes diarios en las horas pico de la ciudad, y es el origen de 530 viajes hacia diferentes zonas de Bogotá.

Figura 7. UPZ La Sabana



Fuente: (Secretaría Distrital de Planeación, 2016a)

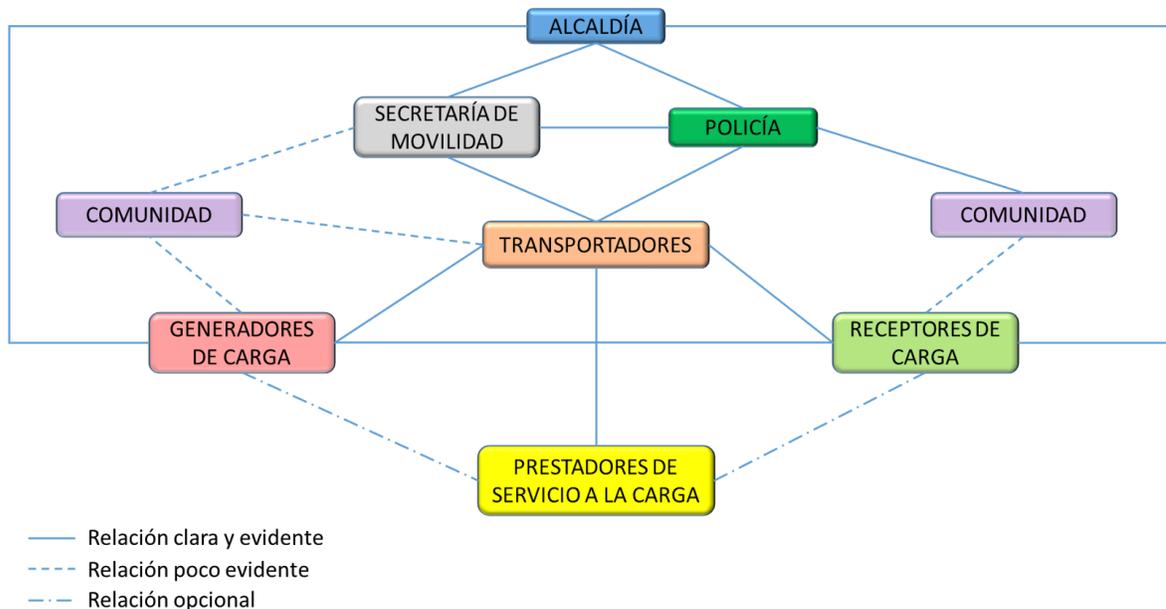
- Alcaldía Mayor de Bogotá: es el ente de gobierno principal de la ciudad. En lo que concierne a Movilidad se destacan principalmente el sistema de transporte público, y la infraestructura de los tramos principales de la ciudad.
- Policía Nacional: “es un cuerpo armado permanente de naturaleza civil, a cargo de la Nación, cuyo fin primordial es el mantenimiento de las condiciones necesarias para el ejercicio de los derechos y libertades públicas, y para asegurar que los habitantes convivan en paz” (Policía Nacional, 2019). Contribuyen con la convivencia y seguridad ciudadana, soportado en el trabajo cercano con la comunidad.
- Generadores de carga: son un conjunto de empresas o individuos que requieren o hacen uso de la distribución de mercancía de carga a través del transporte de bienes (insumos, materias primas o productos terminados), para generar ingresos económicos por unidad de volumen despachada.
- Receptores de carga: son un conjunto de empresas o individuos que requieren o hacen uso de la distribución de mercancía de carga a través del transporte de bienes (insumos, materias primas o productos terminados), para generar gastos operacionales por unidad de volumen recibida.
- Transportistas: son empresas de transporte de carga por carretera, dedicadas al transporte de mercancías desde el punto geográfico de las entidades generadoras, hasta las entidades receptoras, garantizando un determinado número de requerimientos en cuanto a los tiempos de entrega, la calidad del servicio, la conservación del estado óptimo de la mercancía, etc.
- Prestadores de servicios a la carga: Entre los que prestan el servicio a la carga, se encuentra el talento humano que presencia y soporta la carga y/o descarga de mercancía desde el almacén de producto de las entidades generadoras de carga hasta los contenedores o el sistema de transporte, y desde éste mismo hasta el almacén de producto de las entidades receptoras de carga.
- Comunidades aledañas: todo aquel conjunto de zonas residenciales o comerciales contiguas a los sitios de cargue y descargue, que frecuentemente son tenidas en cuenta para el ruteo de desplazamientos de los transportadores o que ven influida su vida diaria directamente el proceso de carga/descarga de mercancías.

En el marco de las operaciones de carga y descarga en la ciudad de Bogotá es posible evidenciar cierto tipo de relaciones que se presentan entre los diversos actores del sistema (ver Figura 10). Estas interacciones se pueden clasificar principalmente en tres categorías: Una relación clara y evidente, en la cual los actores involucrados se encuentran vinculados a través de algún mecanismo o escenario político o socio – económico, como pueden ser leyes, contratos, agremiaciones, entre otros.

La segunda categoría corresponde a una relación poco evidente, donde el vínculo entre actores no se encuentra claramente establecido. Por lo general, no existe ningún marco de referencia que permita una interacción continua y eficiente entre actores, y si existe, no es muy conocido. Así, aunque los generadores y receptores de carga están ubicados cerca a la comunidad, estos no poseen un mecanismo o medio de comunicación establecido.

El tercer tipo de relación son las relaciones opcionales. Este tipo de vínculo hace referencia a aquellas uniones entre actores que se dan en casos específicos. Lo anterior, se puede evidenciar en los casos donde las empresas requieren servicios logísticos de terceros sobre la carga, para operaciones como cargue y descarga, manipulación y almacenaje de mercancías, las cuales corresponden a operaciones que no son requeridas por todas las compañías.

Figura 10. Relaciones entre actores

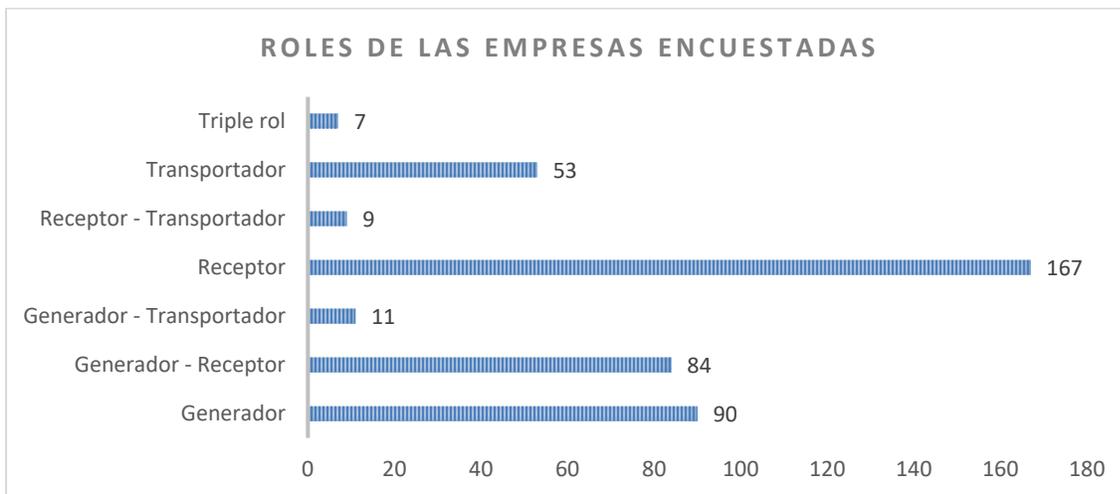


Elaboración propia

Al implementar el cambio de horario en las operaciones de cargue y descargue, se espera que se genere una afectación en los diferentes actores, producto de las relaciones que se muestran en el mapa anterior. En principio, el cargue y descargue nocturno modificaría específicamente las políticas de tres actores: Generadores de carga, transportadores y receptores de carga. Posteriormente, el efecto se transmitirá al resto de actores en la medida que tienen establecida su relación.

Las encuestas aplicadas en el marco del estudio para la renovación de la normativa de restricciones en Bogotá, permiten identificar aspectos acerca de las dinámicas de operación logística en la ciudad. En cuanto al rol de las empresas, se recopiló información acerca de las operaciones logísticas de generadores, receptores y transportadores de carga que decidieron contestar la encuesta realizada asumiendo uno o varios roles. Como resultado, la información recopilada en Bogotá, corresponde a 176 empresas receptoras (9 de las cuales realizan su propia operación de transporte), 101 empresas generadoras (11 de las cuales realizan su propia operación de transporte), 84 empresas que asumieron el doble rol generador/receptor y 53 empresas transportadoras.

Figura 11. Roles de las empresas encuestadas

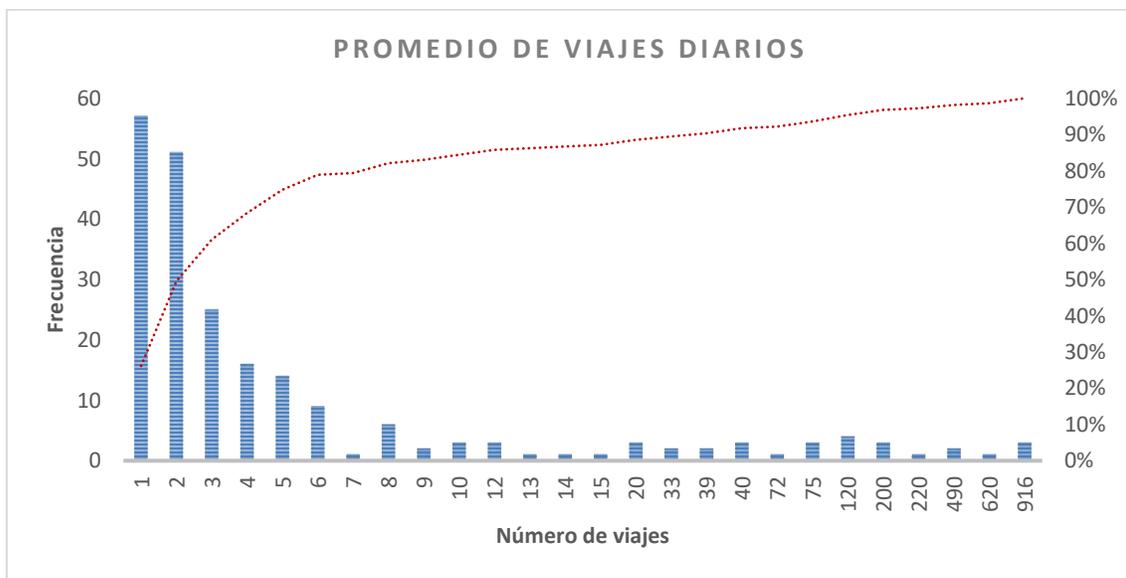


Fuente y elaboración propia

Cada uno de estos actores, tiene intereses y necesidades particulares y cumple roles específicos dentro de las cadenas logísticas que comparten la infraestructura de la ciudad. La generación y demanda de viajes en el marco de sus actividades productivas es uno de los aspectos relevantes a analizar para definir indicadores de desempeño logístico y alternativas viables para su mejoramiento.

En este sentido, los resultados de la encuesta muestran la composición de las necesidades de transporte de las empresas en la ciudad. Como es de esperarse, las empresas más pequeñas, que además son más abundantes, requieren menor cantidad de viajes de carga para realizar su operación, mientras que las grandes empresas operan con hasta 900 viajes diarios. Al construir un diagrama de frecuencias (ver Figura 8) se observa como el 50% de las empresas demanda solo 1 o 2 viajes, el 90% de las empresas suplen sus necesidades de transporte con menos de 40 viajes y tan solo el 10% de las empresas requieren de más de 40 viajes al día.

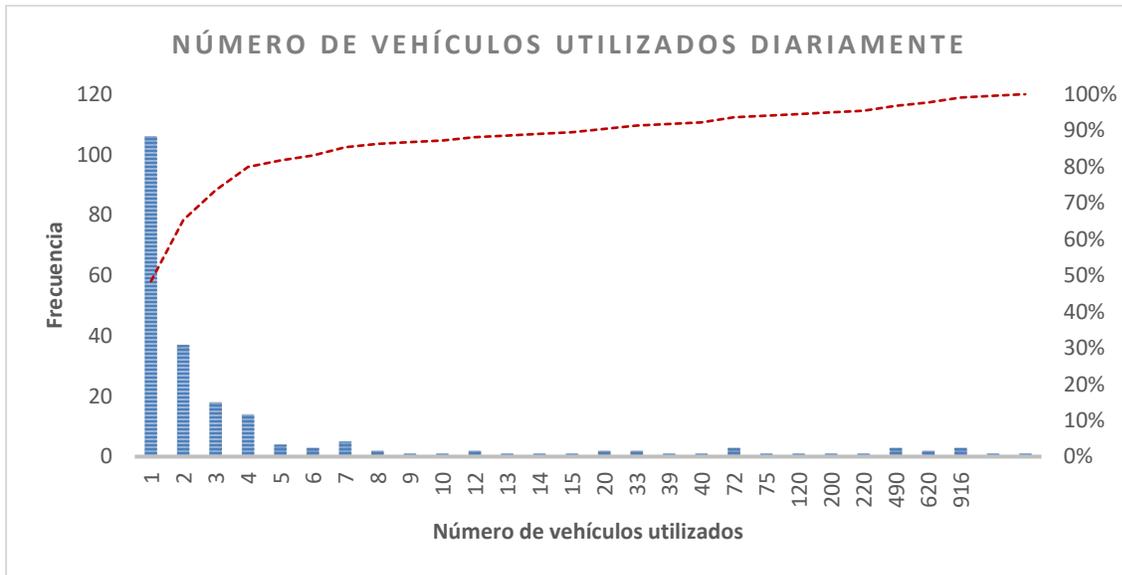
Figura 12. Promedio de viajes requeridos por las empresas diariamente



Fuente y elaboración propia

Se encuentra una distribución idéntica al analizar la flota de vehículos requerida para realizar estas operaciones, en donde el 48% de las empresas desarrollan sus actividades de transporte utilizando solo un vehículo, 75% utilizan menos de tres vehículos y el 90% de suplen sus necesidades de transporte con hasta 30 vehículos. De nuevo, solo el 10% de las empresas utiliza más de 30 vehículos para su operación y tan solo el 1% demanda grandes flotas de hasta 1200 vehículos diariamente.

Figura 13. Número de vehículos utilizados por las empresas diariamente

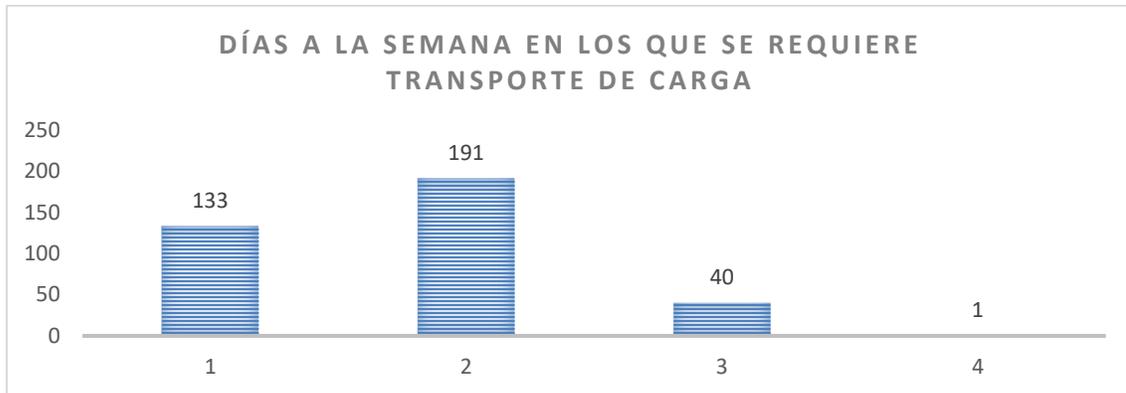


Fuente y elaboración propia

Un gráfico idéntico resulta al analizar la cantidad de viaje que cada uno de estos vehículos realiza durante el día. Sin embargo, la distribución de frecuencias está significativamente más sesgada a la izquierda. 52% de los vehículos, realizan solo un viaje diario, 80% dos o menos viajes y el 97% 5 o menos viajes al día. Tan solo el 3% de los vehículos lleva a cabo más de 5 viajes al día, debido principalmente a los largos tiempos de recorrido, cargue y descargue, que imposibilitan realizar otras operaciones antes de la finalización de la jornada laboral.

Adicionalmente, de los datos recopilados en la encuesta realizada por la secretaría de Movilidad, se puede identificar el número de días en los cuales una empresa determinada requiere realizar operaciones de transporte de carga, encontrando que la mayoría de las empresas encuestadas demandan capacidades transportadoras una o dos veces a la semana (ver Figura 14). Sin embargo, cabe aclarar que las grandes empresas que utilizan grandes flotas de transporte tienen necesidades constantes de transporte y despachan/reciben vehículos diariamente desde sus centros de operación.

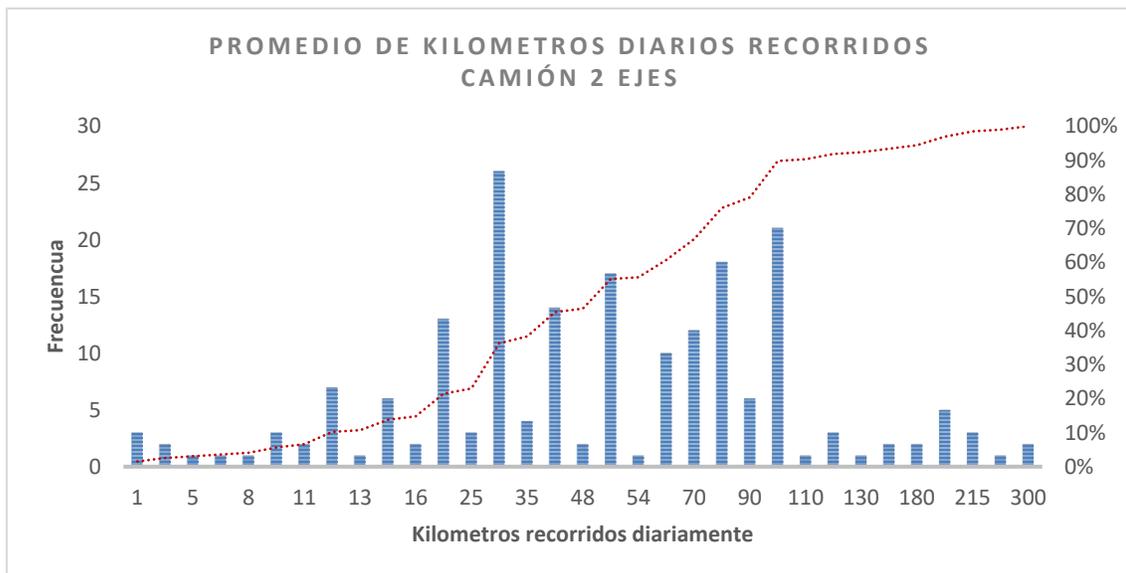
Figura 14. Días a la semana en que se requiere transporte de carga



Fuente y elaboración propia

Por último, en cuanto a la configuración de la flota vehicular que se utiliza para las operaciones de abastecimiento y distribución en la ciudad, se levantó información acerca del tipo de vehículo usualmente utilizado para realizar el transporte, sus características en términos de modelo y número de ejes, además de la distancia recorrida en un día normal de operación. Al analizar esta información se encuentra que usualmente, los vehículos de dos ejes recorren entre 15 y 90 kilómetros al día en la ciudad, mientras que los vehículos más grandes, de 3 ejes entre 20 y 120 km.

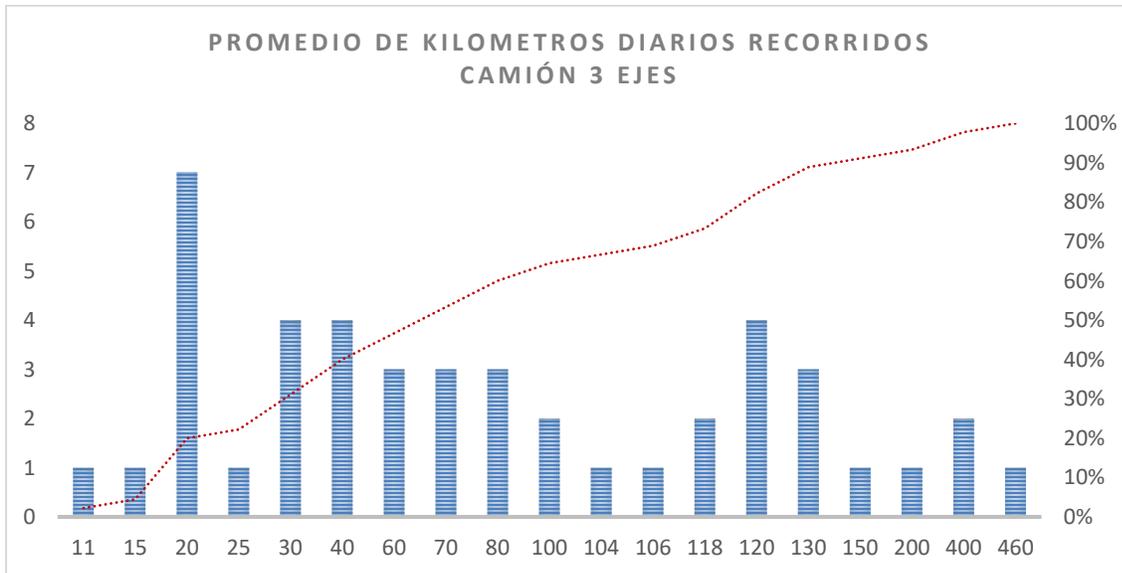
Figura 15. Promedio de kilómetros diarios recorridos – camiones 2 ejes



Fuente y elaboración propia

Es poco probable que un vehículo que realiza la operación de transporte recorra menos de 8 km en un día normal lo que empezaría a explicar el porqué del bajo número de viajes que se llevan a cabo en un solo día. De la misma forma recorrer largas, más de 100 km, distancias vuelve a ser improbable, posiblemente debido a las limitaciones de tiempo y horarios de operación de quienes reciben las mercancías.

Figura 16. Promedio de kilómetros diarios recorridos – camiones 3 ejes



Fuente y elaboración propia

El mismo comportamiento se observa para los vehículos de 3 ejes o más, en donde los recorridos cortos así como los extremadamente largos se hacen menos frecuentes que los recorridos en el rango intermedio.

4.2 Generación de viajes

En promedio, durante un día hábil (lunes a viernes) se realizan alrededor de 158 mil viajes de carga: 74.430 se hacen en vehículos livianos (tipo van y pick-ups) y 83.664 se hacen en camiones de 2 ejes en adelante (Secretaría Distrital de Movilidad, 2019).

En la Figura 19 se presenta el volumen de vehículos de carga que presentan los 9 accesos viales de la ciudad de Bogotá. Se evidencia que la autopista Norte, la calle 80, la calle 13 y la autopista Sur presentan los flujos vehiculares más altos, concentrando el 81% del volumen de vehículos de carga que ingresan y salen de Bogotá. De acuerdo con la

información primaria recopilada, 62% de los viajes de carga tienen como origen y destino el interior de la ciudad, especialmente hacia las UPZ con vocación industrial y comercial anteriormente mencionadas. A su vez, 13% de los viajes de carga corresponden al transporte de productos manufacturados alimenticios, mientras que el 11% corresponden al transporte de materiales de construcción.

Dentro de las horas de mayor demanda para realizar el transporte de carga en la ciudad, se encuentran los períodos comprendidos entre las 10:45 AM y las 11:45 AM, y entre las 2:30 PM y las 3:30 PM. Aunque estos rangos de tiempo no se encuentran con las horas pico de transporte de pasajeros, el flujo general de vehículos particulares hace que se presente mayor congestión en las zonas en las que confluyen los tipos de transporte (pasajeros y carga), independientemente de la hora.

Por su parte, los volúmenes de ocupación vehicular en la ciudad se mantienen alrededor de los 100.000 vehículos en el horario diurno, aun cuando se evidencian horas pico y horas valle en términos de congestión en la ciudad de Bogotá, los horarios en donde existe el potencial de un aprovechamiento eficiente de la de la infraestructura vial, se encuentran alrededor de las 8:00 pm y las 6:00 am.

Figura 17. Volúmenes horarios de los vehículos de carga en Bogotá

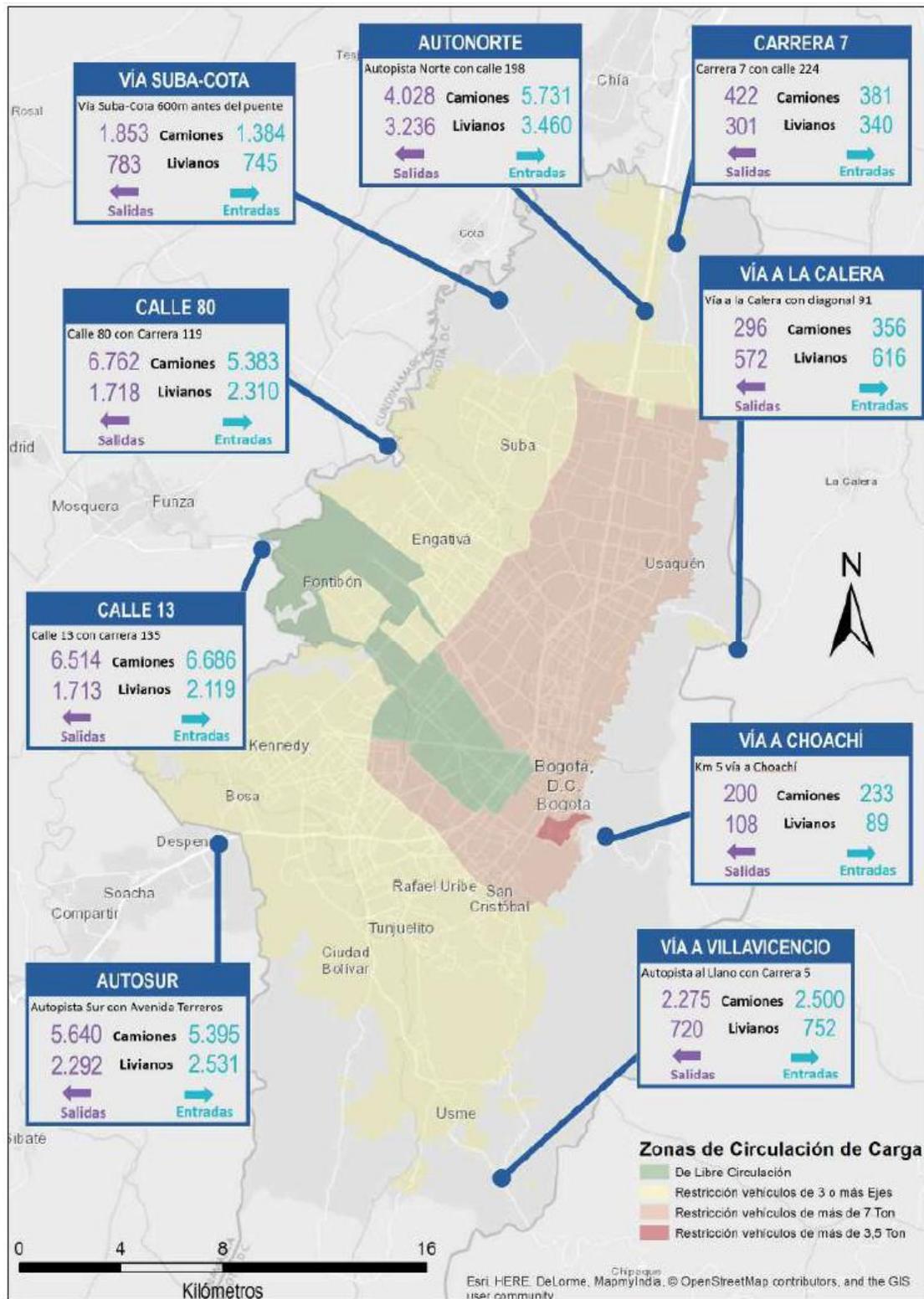


Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

productos más representativas en comercio en relación con las operaciones de cargue fueron manufacturados (8,0%) y bebidas (8,0%), mientras que en industria fue manufacturados (20%) y en servicios mensajería (20%) (ver Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

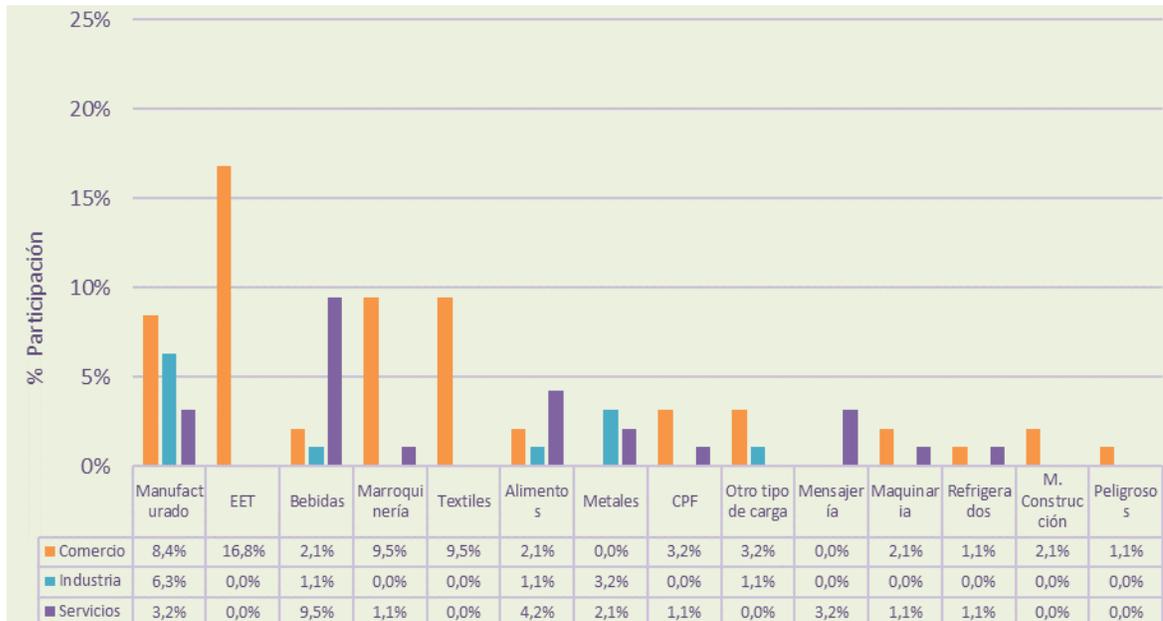
Figura 21).

Figura 19. Volumen de vehículos de carga por acceso vial a Bogotá D.C.



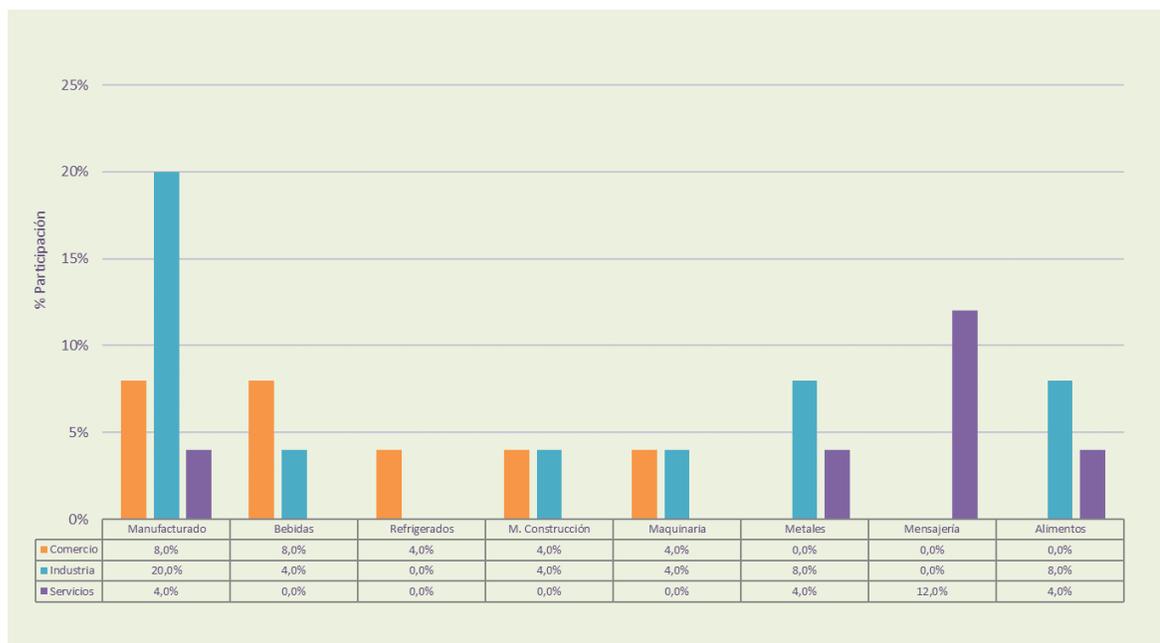
Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

Figura 20. Número de operaciones de descargue según actividad económica – UPZ Zona Industrial



Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

Figura 21. Número de operaciones de cargue según actividad económica – UPZ Zona Industrial



Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

En el caso de la UPZ Puente Aranda, se evidencia que el 74,44% de las operaciones de descargue corresponde a los establecimientos de comercio, mientras que el 22,22% corresponde a la industria y el 3,33%, a los servicios (ver Figura 22). A su vez, los productos que implican más operaciones son los de la categoría de manufacturados (48,9%), la cual agrupa productos tan dispares como textiles y calzados, productos de aseo y cosmética. Por su parte, en servicios, se concentran las categorías relacionadas con alimentación (2,2%). Por último, el sector industrial recibe manufacturados (13,3%) y productos de tipo alimentos para transformación como granos (1,1%). Por su parte, el cargue de mercancías tiene una mayor representación en el comercio con una participación del 66,67% (ver Figura 23). La actividad industrial presenta una participación del 35,25% y en menor medida, se encuentran los servicios con un 2,08%.

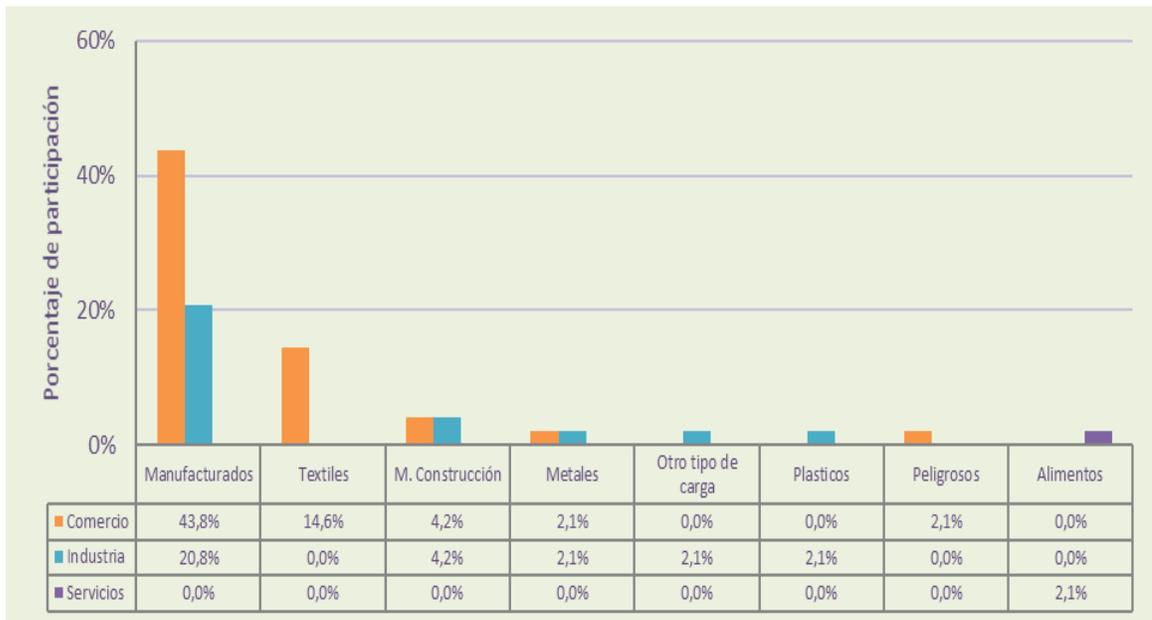
Figura 22. Número de operaciones de descargue según actividad económica – UPZ Puente Aranda



Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

Para la UPZ La Candelaria, se evidencia que los tipos de carga más usuales durante las operaciones de cargue y/o descargue fueron los productos alimenticios (46,6%), las bebidas (8,9%) y los manufacturados (4,8%).

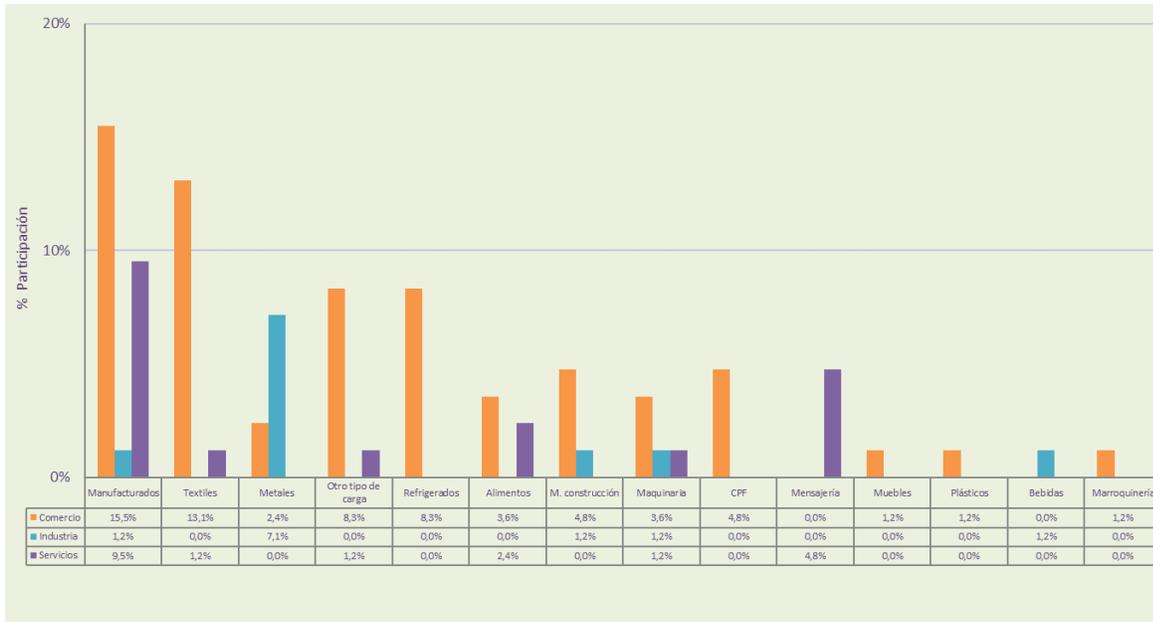
Figura 23. Número de operaciones de carga según actividad económica – UPZ Puente Aranda



Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

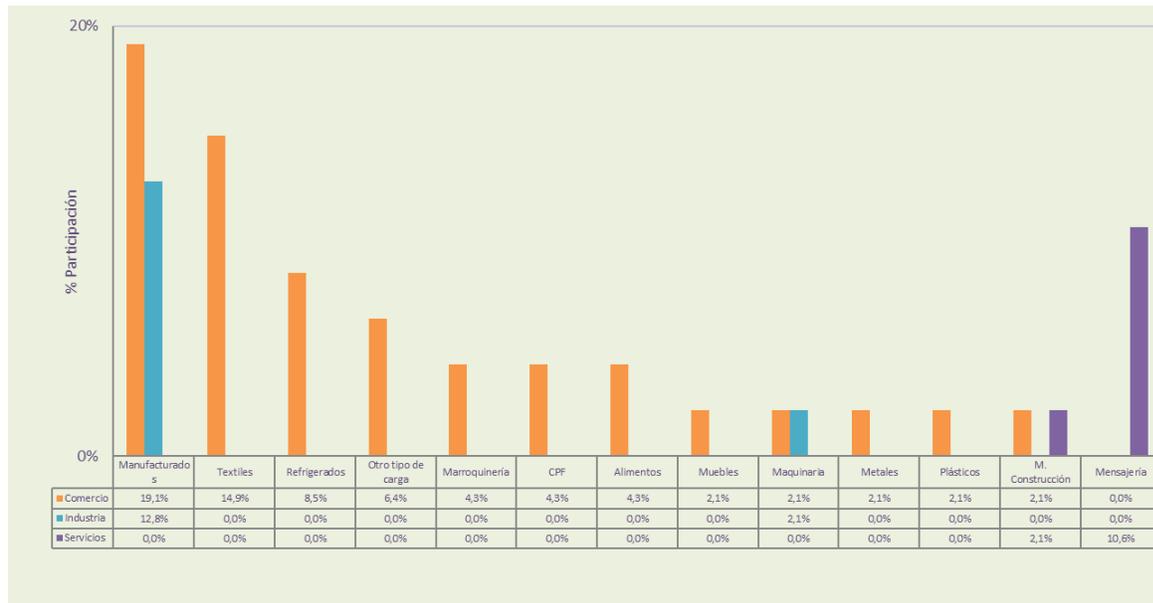
Para la UPZ La Sabana, se evidencia que el 67% de las operaciones de descargue se realizan en establecimientos comerciales, mientras que el 11,1% llegaron a establecimientos industriales y el 20,4% a establecimientos de servicio. A su vez, los productos que más llegan al comercio son manufacturados con el 15,5%; esta categoría agrupa productos que tengan algún proceso metalmecánico, productos de papelería, muebles y repuestos los cuales corresponden a las principales actividades comerciales que se llevan a cabo en la UPZ. Por su parte, en servicios se concentran las categorías relacionadas a manufacturados (9,24%) y mensajería (4,7%) principalmente. Por su parte, el cargue de mercancías en esta UPZ tiene mayor representación en la industria; el 72% de las operaciones de cargue se realizan en establecimientos comerciales, mientras que el 15 % llegaron a establecimientos industriales y el 12 % a los de servicio. Los productos que generan mayor número de operaciones de cargue son los manufacturados con el 19,1%.

Figura 24. Número de operaciones de descargue según actividad económica – UPZ La Sabana



Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

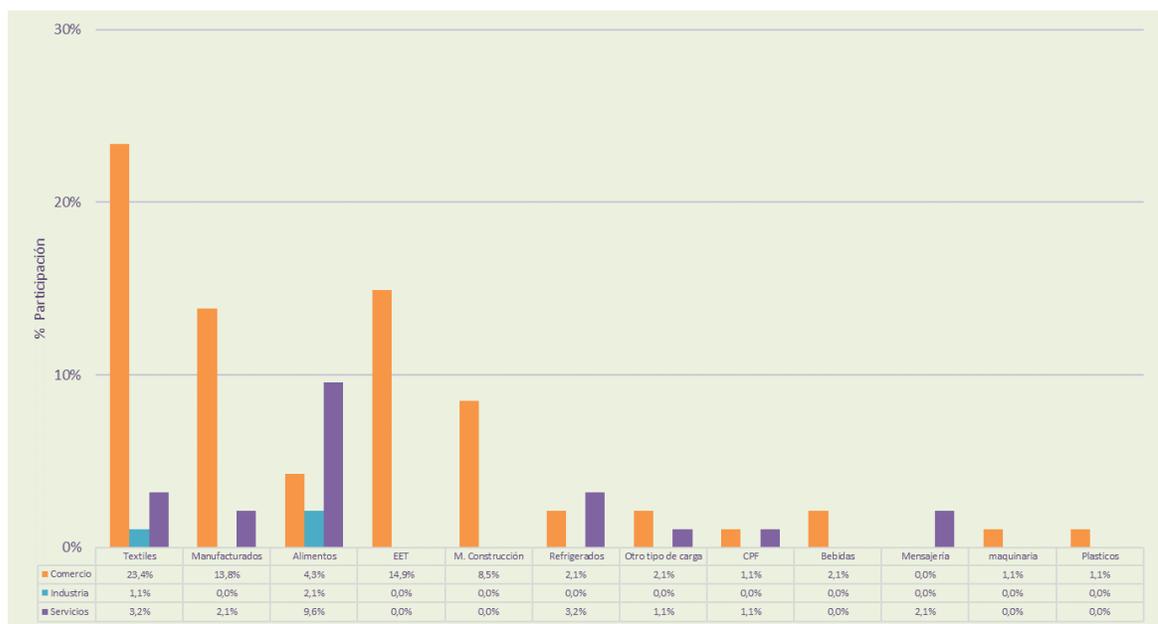
Figura 25. Número de operaciones de cargue según actividad económica – UPZ La Sabana



Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

Finalmente, para la UPZ Las Nieves, se tiene que los productos que más llegan al comercio son textiles en un 23,4%, y manufacturados con 13,8% (principales actividades comerciales de la UPZ) (ver Figura 26). Por su parte, en servicios se concentran las categorías relacionadas con alimentos (9,6%) seguido por textiles y refrigerados con 3,2%. Por último, el sector industrial recibe productos tipo alimentos (2,1%), y textiles (1,1%). En cuanto a las actividades de descargue, en el sector comercial el 23,4% corresponde a operaciones de carga de textiles, siendo este el tipo de producto más frecuente en cargue, seguido por la categoría de manufacturados, que presentan un comportamiento similar a las operaciones de descargue de la zona.

Figura 26. Número de operaciones de descargue según actividad económica – UPZ Las Nieves

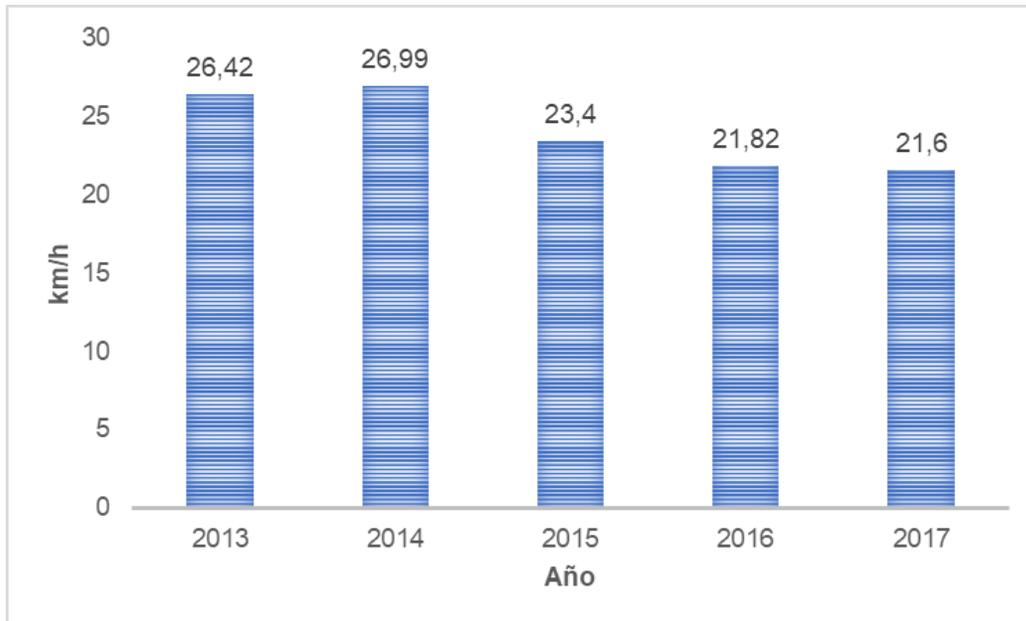


Fuente: Adaptado de Secretaría Distrital de Movilidad

4.3 Problemáticas asociadas al horario de operación

En los últimos años se ha evidenciado un aumento considerable del número de vehículos particulares en la ciudad de Bogotá (alrededor de 2.400.000 registrados a corte de 2018, casi el doble que en 2013) (Bogotá cómo vamos, 2019). Esta situación ha generado una notable disminución en la velocidad promedio de circulación en la ciudad (Ver Figura 27).

Figura 27. Velocidad promedio general (km/h) para la ciudad de Bogotá



Fuente: Adaptación de (Cámara de Comercio de Bogotá, 2020b)

Bogotá es una ciudad propensa a la congestión vehicular porque presenta características particulares como las que destaca CEPAL (2003):

- La demanda de transporte responde a la necesidad de acceder a sitios en los que se llevan a cabo las actividades cotidianas: trabajo, estudio, compras, recreación, descanso, y otros. Todas estas actividades se desarrollan en diferentes lugares, y en particular para Bogotá, pueden existir zonas con vocación mixta, haciendo que las operaciones de carga y descarga de mercancías se lleven a cabo en vía pública, en espacios no destinados para tal actividad.
- La demanda de transporte es variable y tiene zonas en la ciudad en las que se concentran muchos viajes, teniendo en cuenta la necesidad de aprovechar los horarios de trabajo para realizar las distintas actividades de forma coordinada, sin incurrir en horas ni costos adicionales.
- Las opciones de transporte más atractivas – seguridad de la carga, comodidad y flexibilidad de horarios, confiabilidad en la hora de recepción de carga, disponibilidad de personal, control de costos – se presenta en los horarios convencionales, en los cuales se comparte espacio vial con el transporte de pasajeros.

- La calidad de la infraestructura vial se ve afectada por el uso para el que esté destinado. En algunas ocasiones se evidencia el tránsito de vehículos de carga por zonas viales no aptas, lo que genera deterioro de las vías y como consecuencia, mayor congestión vial. De acuerdo con el diagnóstico de pavimentos de la malla rural de Bogotá (IDU, 2019), en el año 2018, 45.4% de la malla vial se encontraba en mal estado, seguida por un 45,.4% que se encontraba en estado regular.
- El costo de la congestión no es percibido directamente por los usuarios que contribuyen a generarla. Como los usuarios no advierten los mayores costos de operación y tiempo que generan a los demás, sus decisiones sobre modo, ruta, hora, origen y destino de los viajes son tomadas, no teniendo como base los costos sociales, sino una percepción parcial de los costos propios. El resultado es una sobreexplotación de algunas zonas en la ciudad, especialmente en horas pico.

En el caso particular de la ciudad de Bogotá, como consecuencia de la mezcla de vocaciones y actividades dentro de las UPZ y localidades de la ciudad, las áreas destinadas al parqueo vehicular de carga, cargue y descargue de mercancías resultan ser muy escasas. Por esta razón, el personal encargado de realizar estas actividades para satisfacer las necesidades de sus clientes se ve obligado a llevarlas a cabo en zonas prohibidas, invadiendo el espacio público que normalmente está destinado al flujo vehicular. Esta situación, en combinación con la invasión del espacio público por el comercio formal e informal, reduce la zona vial disponible para la circulación vial en la ciudad, generando altos niveles de congestión en toda la capital.

5. Horario alternativo para operaciones de abastecimiento

Con base en la caracterización realizada sobre las zonas congestionadas en la ciudad de Bogotá, los procesos, actores involucrados e impactados y las relaciones presentes entre estos, es posible reconocer la importancia de identificar estrategias para promover el desarrollo de las actividades de transporte de carga en horarios alternativos, buscando la optimización de la movilidad urbana y la generación de mejores condiciones de calidad de vida para los ciudadanos y el medio ambiente (reducción de material particulado en el aire y emisiones de gases de efecto invernadero). En adición a esto, se busca mejorar la competitividad de las empresas a través de la reducción de costos por las externalidades generadas como consecuencia de la reducción de velocidad promedio en la ciudad.

5.1 Impacto del cambio de horario en las operaciones de abastecimiento

En la Tabla 2 se enuncian de manera general las afectaciones que sufrirán cada uno de los actores, producto de la implementación de la política de cargue y descargue en un horario alternativo.

Tabla 2. Posibles impactos en *stakeholders* por cambio de horario en operaciones

Actor	Afectaciones
Alcaldía	<ul style="list-style-type: none">• Costos producto de las reducciones de impuestos e incentivos tributarios otorgados a las empresas que hagan C/D nocturno, ya que estas operaciones deben estar notablemente subsidiadas.• Deberá asumir costos financieros y de recurso humano de tener una ciudad que funcione las 24 horas.• Costo de contratos con Policía de Tránsito y con Policía Metropolitana para garantizar la seguridad de los diferentes actores y de la carga.• Creación e implementación de planes de mitigación de la afectación que la iniciativa genera sobre la comunidad y las empresas.

Actor	Afectaciones
Secretaría de Movilidad	<ul style="list-style-type: none"> ● Seguimiento permanente a la iniciativa. ● Tener personal disponible las 24 horas, ya que esta iniciativa debe ir acompañada de un funcionamiento de esta dependencia durante todo el día.
Policía	<ul style="list-style-type: none"> ● Deben disponer de un mayor número de personal dispuesto a trabajar durante las horas de la noche para supervisar la movilización de los vehículos. ● Existe un cargo adicional en el salario por el trabajo en el turno nocturno.
Generadores de Carga	<ul style="list-style-type: none"> ● Necesitan habilitar las instalaciones de la planta para que puedan recibir los camiones y cargar la mercancía durante la noche. ● Requieren personal dispuesto a trabajar durante las horas de la noche. ● Existe un cargo adicional en el salario por el trabajo en el turno nocturno.
Transportadores	<ul style="list-style-type: none"> ● Tienen un intervalo de cargue y descargue corto para realizar sus actividades, el cual se puede ver afectado por el tiempo de movilización en las vías. ● Requieren personal dispuesto a trabajar durante las horas de la noche. ● Existe un cargo adicional en el salario por el trabajo en el turno nocturno.
Receptores de Carga	<ul style="list-style-type: none"> ● Necesitan habilitar las instalaciones de la planta para que puedan recibir los camiones y cargar la mercancía durante la noche. ● Requieren personal dispuesto a trabajar durante las horas de la noche. ● Existe un cargo adicional en el salario por el trabajo en el turno nocturno.
Comunidad	<ul style="list-style-type: none"> ● La movilización de vehículos y las actividades de cargue y descargue en las horas de la noche generan ruido en los alrededores.
Prestadores de Servicio a la carga	<ul style="list-style-type: none"> ● Necesitan habilitar las instalaciones para que puedan realizar operaciones logísticas durante la noche. ● Requieren personal dispuesto a trabajar durante las horas de la noche. ● Existe un cargo adicional en el salario por el trabajo en el turno nocturno.

Fuente propia

5.2 Modelo conceptual

En esta sección se presenta el modelo conceptual sobre el cual se desarrolla la investigación, describiendo sus objetivos, los actores que se tienen en cuenta y las relaciones entre ellos, además, se describen los supuestos a partir de los cuales se construyó la simulación.

5.2.1 Objetivos del modelo

Simular las operaciones logísticas de empresas generadoras, receptoras y transportadoras de carga en la ciudad de Bogotá, con el fin de evaluar el impacto del cambio de horario en el que se realizan dichas operaciones en su desempeño logístico. Inicialmente, se busca simular el estado actual de las operaciones llevadas a cabo por empresas en la ciudad, aplicar posteriormente la alternativa de actividades realizada en horarios no convencionales, y evaluar si se presentan mejoras en el desempeño logístico de dichas empresas. Finalmente, se busca evidenciar las condiciones que deben presentarse en un escenario real para que la implementación de actividades en horarios no convencionales pueda darse exitosamente.

5.2.2 Agentes y procesos

Agentes:

- Generadores: Agentes responsables de la generación de carga en la ciudad. De acuerdo con la información recopilada, se tiene en cuenta información de 134 empresas en esta categoría.
- Receptores: Agentes que reciben la carga en la ciudad. Se incluyen establecimientos de comercio. En el modelo se tienen en cuenta las características de 223 empresas.
- Transportadores: Agentes responsables del transporte de carga en la ciudad. Para la construcción del modelo se tiene en cuenta la información recopilada de 55 transportistas.

Para este modelo de simulación no se tienen en cuenta otros agentes indirectos como la ciudadanía no involucrada en las operaciones, debido a que no presentan relaciones de interacción con los agentes relacionados previamente. Aunque no se tienen en cuenta dentro del modelo, se considera su influencia en la velocidad de recorrido que se toma en cuenta para ejecutar la simulación

Procesos:

- Envío: Corresponde al envío de mercancías por parte de las empresas generadoras de carga. Cada uno de los generadores de carga, envía mercancías a sus correspondientes clientes. Para la definición de este proceso, se tuvo en cuenta la información recolectada respecto a la cantidad de viajes que una empresa

determinada despacha en promedio diariamente, tal y como se describe en la sección 4.

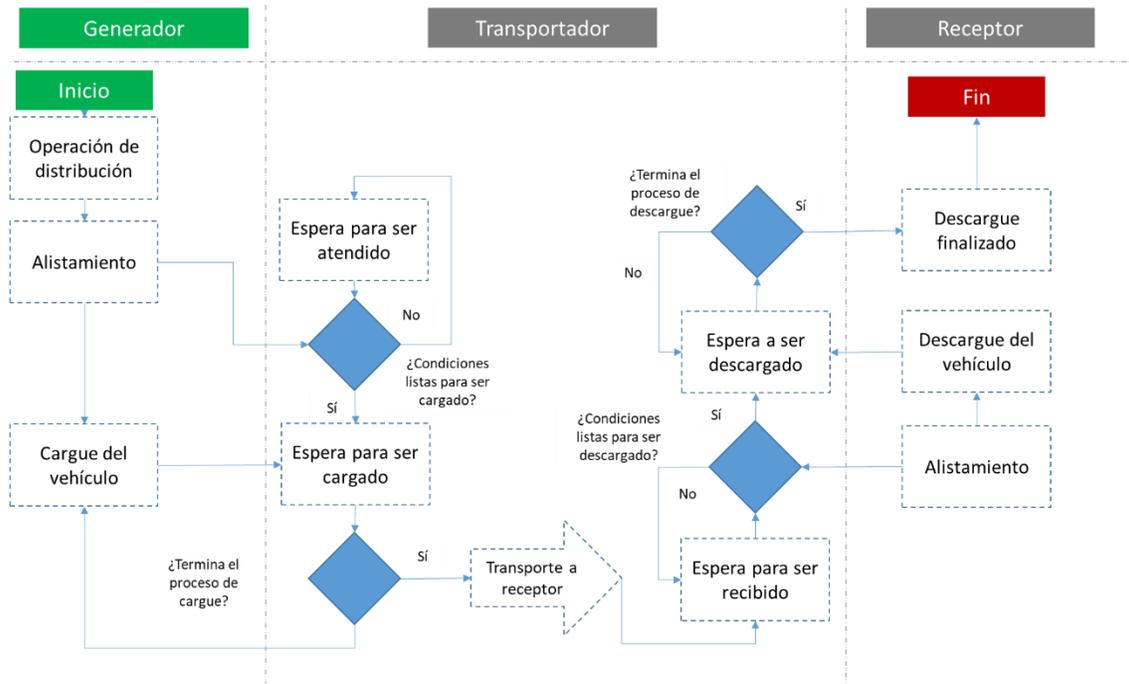
Dentro del procedimiento de envío se tienen en cuenta los tiempos de alistamiento y cargue de mercancías. Adicionalmente se relacionan costos de utilización de la infraestructura y el costo de personal involucrado en la operación.

- Transporte: Movilización de carga desde los puntos de origen a los puntos de destino, una vez asignados clientes a los generadores de carga, se asignan también una serie de vehículos que serán los encargados de la operación de distribución.

En el proceso de transporte se tienen en cuenta las áreas congestionadas de la ciudad, ubicadas al azar dentro del espacio del modelo en las cuales las velocidades de movilización de los vehículos disminuyen en la medida en que se adentran en las áreas de mayor congestión. Adicionalmente, para el transportador se tienen en cuenta los costos asociados a la utilización del vehículo, los tiempos de alistamiento, cargue y descargue, así como al tiempo dedicado por su conductor a la operación de transporte.

- Recepción: Corresponde al proceso de recibir las mercancías en el establecimiento de destino, los receptores de carga hacen el papel de clientes de los generadores y son quienes reciben a vehículo transportador. Para la recepción de mercancías se tienen en cuenta los tiempos de alistamiento, los tiempos de espera para el descargue y los costos de utilización de la infraestructura y la mano de obra relacionados a la operación.

Figura 28. Modelo Conceptual



Fuente propia

5.2.3 Supuestos del modelo

Tratándose de un modelo de simulación que pretende replicar características específicas de la operación real de abastecimiento en la ciudad de Bogotá, se hace necesario definir algunos supuestos que simplifican la modelación y le dan estructura a la simulación. A continuación se describen los supuestos utilizados:

- La simulación no tiene en cuenta los niveles de inventario de las empresas generadoras ni receptoras de carga, se asume que la política de inventarios es coherente con las necesidades de transporte y deriva en el número de viajes necesarios diariamente.
- El número de viajes enviados por los generadores de carga se define a partir de los resultados de la encuesta aplicada por la secretaría distrital de movilidad en 2019, como se describe más atrás.
- La simulación corre paso a paso siguiendo la estructura del software Netlogo, en donde cada *step* o *tick* representa un minuto.

- En el modelo de simulación se definen áreas con tres niveles de congestión diferentes: baja, media, alta y cada uno influye directamente en la velocidad de movilización de los transportadores. Esta velocidad de movilización fue extraída de las fuentes secundarias reseñadas más atrás.
- El tamaño de las empresas no se tiene en cuenta directamente, para modelarlo, en la simulación se creó una distribución de probabilidad empírica basada en la información recolectada en las encuestas, en donde cada generador tiene cierto número de clientes que atender. A mayor número de clientes, mayor tamaño de la empresa.
- Los generadores de carga hacen las veces de punto de inicio para el recorrido de los transportadores, a su vez, los receptores hacen las veces de punto de destino. Enfocando así la atención en el proceso de envío – transporte – recepción de mercancías.
- Los tiempos de espera para ser atendido por el generador, el tiempo de espera para el cargue, el tiempo de espera para ser atendido por el receptor y el tiempo de espera para el descargue se asumen distribuidos normalmente y se extraen de la encuesta nacional logística y los resultados del Piloto de Cargue y Descargue Nocturno en Bogotá.
- Se asume que el transportador ha terminado su operación, una vez ha visitado hasta el último de los receptores asignados a su ruta.
- Las zonas de congestión varían en extensión y cantidad en el escenario diurno vs el escenario nocturno.
- La ventana de operación en el horario diurno se asume de 14 horas, de 6 am a 8 pm, mientras que en el horario nocturno se tienen 10 horas, de 8 pm a 6 am.

5.2.4 Funcionamiento del modelo, Variables de decisión y datos utilizados

En este modelo de simulación los agentes toman decisiones basadas en el cumplimiento de objetivos de distribución para los generadores, transporte para los transportadores y abastecimiento para los receptores. Cada actor juega su papel en el marco de una serie

de condicionamientos fijos, ej: el seguimiento de cierta ruta de distribución y se ve influenciado por parámetros con características estocásticas.

El modelo evalúa dos escenarios de operación Diurno y Nocturno en donde las características fundamentales de la distribución y abastecimiento se mantienen, pero en donde las condiciones externas de movilización varían y generan cambios en las dinámicas internas de operación. Esto permite evaluar indicadores de desempeño que se ven impactados directamente por el cambio en el horario de operación. A continuación se presentan de manera general las principales funciones del modelo.

Creación del entorno de simulación: El espacio para la simulación se representa en una cuadrícula de 600 por 300 en donde cada uno de los espacios representa 200m. En total, la máxima distancia que un agente transportador puede recorrer es de 120km lo que representaría aproximadamente 4 viajes de extremo norte a sur de la ciudad de Bogotá y es suficiente para simular los viajes de distribución generados por las empresas.

Adicionalmente, se crean círculos de áreas congestionadas que representan las zonas de alta congestión de la ciudad; alrededor de estos, se crean áreas de mediana congestión. La cantidad y la extensión de estas áreas es una de las variables modificables del modelo.

Creación de los generadores de carga: Cada una de las corridas de la simulación representa un generador de carga al cual se le asigna un número de rutas, vehículos y clientes siguiendo las características derivadas del análisis de los resultados de las encuestas y la información secundaria referenciada anteriormente.

Asignación de rutas: Para cada generador de carga, se asigna un número de rutas que sigue una distribución de probabilidad que encaja con los resultados de la encuesta realizada, así 52% de los vehículos, realizan solo un viaje diario, 80% dos o menos viajes y el 97% 5 o menos viajes al día. Tan solo el 3% de los vehículos lleva a cabo más de 5 viajes al día.

Creación de los transportadores: Para cada una de las rutas asignadas a cada generador se crea un transportador que tiene como objetivo atender a los receptores de carga que se encuentren en esa ruta. Una vez visitado el último receptor el transportador finaliza su actividad.

Creación de los receptores: Para cada ruta de entregas creada en los transportadores de carga se crea y ubica un número de receptores de carga que deberán ser atendidos por los transportadores.

Asignación de tiempos de espera y operación: Los generadores y receptores de carga tienen dentro del modelo de simulación ciertas características generadas siguiendo una distribución de probabilidad que se asume normal, centrada en el valor de tiempo extraído de la Encuesta Nacional Logística y el Resultado de los Pilotos de Cargue y Descargue Nocturno en Bogotá. Se definen tiempos asociados a cuatro etapas del proceso, el tiempo de espera para iniciar el cargue y la duración de la operación de cargue para los generadores, así como el tiempo de espera para empezar el descargue y el tiempo de duración del mismo para los receptores.

Transporte: Para la operación de transporte, los vehículos asignados a cada ruta se mueven por el espacio de simulación siguiendo las reglas establecidas respecto a velocidad por las zonas de alta, media y baja congestión. Al iniciar su operación se aplican los tiempos de espera de cargue y al visitar cada uno de los clientes se aplican los tiempos de espera del descargue.

Cambio de horario de operación: El contraste entre el desempeño de los actores en los dos escenarios de operación se realiza modificando los parámetros de velocidad y congestión asignados al modelo.

5.3 Modelo de simulación

El modelo de simulación se realiza en el software Netlogo teniendo en cuenta un criterio de conveniencia, especialmente en términos de facilidad de programación y amplio campo de aplicación, como es el caso de esta investigación.

Netloho es una plataforma de desarrollo integrada basada en agentes, siendo un software gratuito y de código abierto que fue lanzado bajo una Licencia Pública General (GPL por sus siglas en inglés) (Northwestern University, 1999). El entorno NetLogo permite la exploración de fenómenos emergentes a partir de comportamientos de cada agente, y viene con una extensa biblioteca de modelos en una variedad de dominios como economía, biología, física, química, psicología y dinámica de sistemas.

NetLogo utiliza un lenguaje de programación funcional, lo que significa que muchas declaraciones de lenguaje se leen casi como oraciones. Adicionalmente, los modelos de NetLogo se pueden compartir sin esfuerzo como applets de Java, y esto significa que casi todas (si no todas) las plataformas de computadora. También es posible realizar un mejor análisis estadístico de resultados gracias a un complemento que permite la comunicación entre NetLogo y R, un software estadístico muy conocido

El modelo pretende simular la operación de distribución / abastecimiento de mercancías en entornos congestionados en dos horarios de operación, uno diurno y otro nocturno. Los generadores de carga envían vehículos para suplir la demanda de sus clientes / receptores. Por su parte, el transportador enfoca sus esfuerzos en cumplir con la ruta asignada y visitar la mayor cantidad de receptores en su horario de operación. Finalmente, el receptor de carga destina los recursos necesarios para recibir los vehículos y satisfacer su demanda en el momento en que este se aproxima a su ubicación.

5.4 Implementación

El modelo de simulación se construyó con base en la información descrita en el capítulo 5.1. Como se ha venido mencionando, se llevan a cabo simulaciones en dos escenarios, un escenario diurno y un escenario nocturno.

Con la simulación del primer escenario, se busca identificar ineficiencias en la operación logística de distribución, transporte y abastecimiento en la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta que el desarrollo de sus actividades se ve impactado directamente por la congestión vehicular de la ciudad y que, según la información recolectada, la ventana de operación diurna pareciera no ser suficiente para suplir al 100% las necesidades de transporte de las empresas.

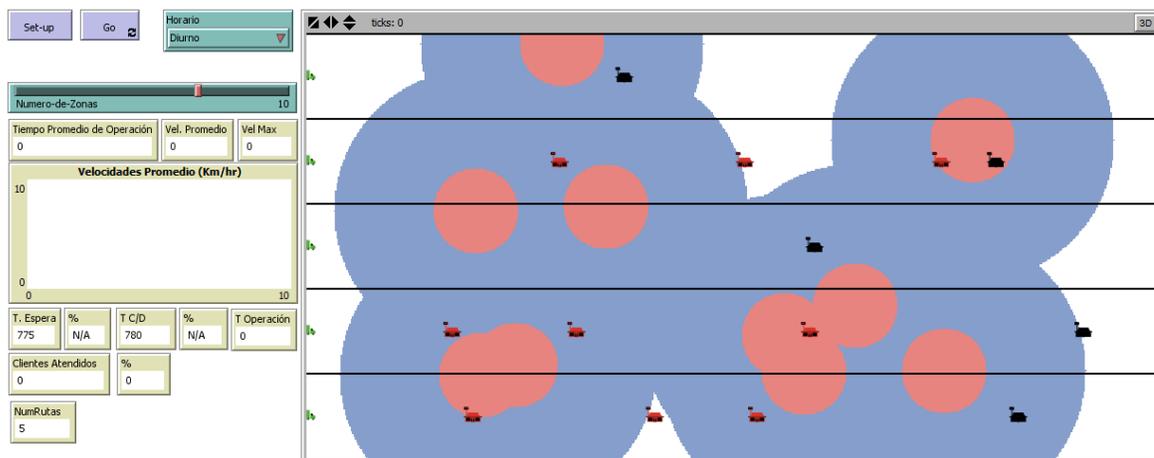
En un segundo momento, en el modelo de simulación se implementa un cambio en el horario de operación de las empresas, en el que aun reduciendo la ventana horaria de atención, de 14 a 10 horas, se espera encontrar mejores indicadores de desempeño logístico en términos de tiempos y niveles de atención. Estas mejoras responderían a la minimización de las externalidades negativas de la operación de distribución, transporte y almacenamiento al hacer uso de la infraestructura de la ciudad en un periodo de tiempo en el que no se encuentra saturada.

El modelo se implementó en el software Netlogo y se usó un criterio de tiempo en el que un tick de la simulación corresponde a un minuto. Para cada escenario, se simula la ventana de atención completa, de 14 horas para el escenario diurno vs 10 horas para el escenario nocturno y se corren simulaciones para 50 generadores de carga y sus correspondientes transportadores y clientes en los dos escenarios.

La configuración inicial del modelo muestra la ubicación inicial de los receptores y los transportadores. Se asume que el punto de inicio, a la derecha del espacio de simulación corresponde a la ubicación del generador de carga. Esta configuración inicial varía en términos de cuantas rutas y receptores se asignan a cada generador para cada escenario. Una nueva corrida del modelo representa un nuevo generador y en consecuencia, una nueva operación de distribución, transporte y abastecimiento.

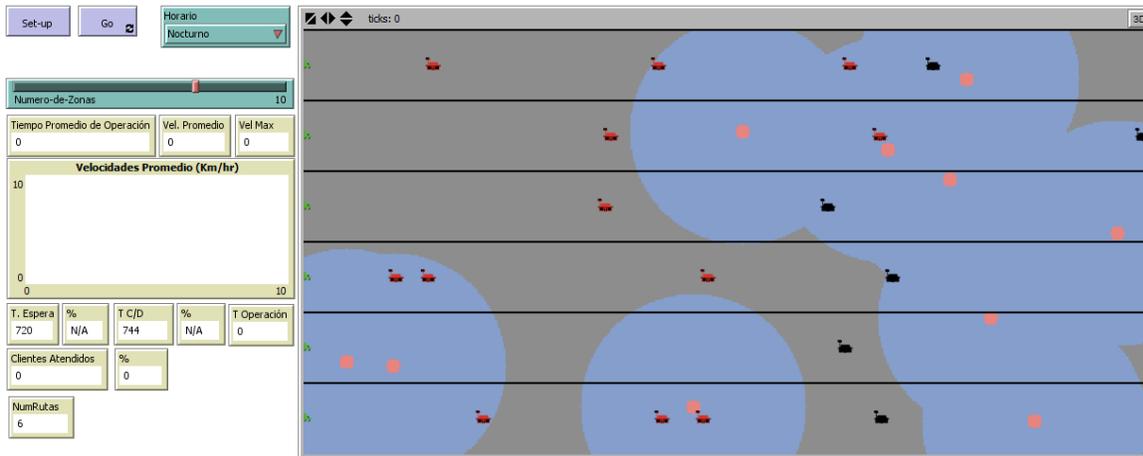
En la configuración inicial se pueden observar también las zonas con congestión media, en azul y con congestión fuerte en rojo, además de la ubicación de los transportadores al iniciar el recorrido y de los clientes que deben ser atendidos en cada una de las rutas. En las Figura 29 y Figura 30 se presenta la configuración inicial del modelo.

Figura 29. Ambiente de simulación del modelo - Diurno



Fuente propia

Figura 30. Ambiente de simulación del modelo - Nocturno



Fuente propia

Con esta configuración, se realizó la simulación para 50 generadores de carga y sus correspondientes transportadores y clientes evaluando 10 indicadores de desempeño de la operación en los dos escenarios: diurno y nocturno (Ver Tabla 3). Los resultados que se presentan en este capítulo hacen referencia a 30 simulaciones para 50 generadores de carga en los dos escenarios.

Tabla 3. Indicadores evaluados

Indicador	Descripción
Tiempo Promedio de Operación	Representa el tiempo promedio que tarda una operación de distribución, transporte y abastecimiento en ser realizada, se contabiliza desde la llegada del vehículo a las instalaciones del generador para iniciar el cargue hasta la finalización del último descargue asignado a ese vehículo
Velocidad Promedio	La velocidad promedio de recorrido de los vehículos de transporte asignados a las rutas de distribución
Velocidad Máxima	La máxima velocidad del sistema
Tiempo de Espera Total	El tiempo de espera total para todas las rutas asignadas, en este tiempo se incluyen las esperas en el generador de carga y las esperas para ser atendido en cada uno de los receptores de carga

% de Tiempo de Espera	La proporción del tiempo total de operación que corresponde a tiempo de espera, este tiempo se considera ineficiente y busca ser reducido al implementar entregas en horario nocturno
Tiempo de Cargue / Descargue	El tiempo de atención total para todas las rutas asignadas, en este tiempo se incluyen las esperas en el generador de carga y las esperas para ser atendido en cada uno de los receptores de carga
% de Tiempo de Cargue / Descargue	La proporción del tiempo total de operación que corresponde a tiempo de atención, este tiempo hace parte de la operación normal y no se considera una ineficiencia en si mismo, sin embargo también busca ser reducido al implementar el escenario alterno
% de Clientes atendidos	Proporción de todos los clientes asignados que logra ser atendida en la ventana de tiempo diurna o nocturna.

Fuente propia

5.4.1 Resultados – Escenario Diurno

Este escenario representa la dinámica normal de operación de las empresas actualmente, bajo estas condiciones, los vehículos que realizan las operaciones de transporte se ven directamente afectados por las condiciones de congestión en la ciudad. Este impacto se ve reflejado en menores velocidades de recorrido y mayores tiempos de operación. Adicionalmente, desde las perspectiva de los generadores y transportadores, la confluencia de vehículos en sus instalaciones además de los fenómenos de interferencia de los recursos (por atender diversos tipos de operaciones a la vez) producen mayores tiempos de espera y de atención.

Indicadores como la velocidad promedio de recorrido, en donde se agregan las velocidades de todos los transportadores involucrados en el proceso de distribución, dejan ver como las áreas congestionadas tienen un impacto negativo en el desempeño de la operación en general.

Para las 14 horas simuladas, se pueden identificar horas valle y horas pico en la operación, en las que las velocidades de recorrido aumentan y disminuyen periódicamente. Este fenómeno en particular es el condicionante principal del desempeño de las actividades de distribución, transporte y abastecimiento.

Figura 31. Velocidades promedio – Escenario Diurno



Fuente propia

En términos de tiempos de espera, el modelo muestra que para las operaciones en horario diurno, el en promedio el 60% del tiempo total de operación corresponde a esperar para ser atendido en el generador o el receptor de mercancías. Esta alta ineficiencia en las operaciones es uno de los principales aspectos que se espera modificar en el momento en que se migren las operaciones de un horario diurno a un horario nocturno.

De la misma forma, los tiempos de atención en las operaciones efectivas de cargue y descargue en promedio alcanzan un 40.4% del tiempo total de operación. De nuevo, un alto porcentaje del total del tiempo utilizado para el desarrollo de la actividad en general.

Tabla 4. Resultados – Escenario Diurno

Indicador	Resultado	Unidad
Tiempo Promedio de Operación	12.91	Horas
Velocidad Promedio	14.34	Km/h
Velocidad Máxima	25.65	Km/h
Tiempo de Espera Total	60.03	h
% de Tiempo de Espera	60.88	%
Tiempo de Cargue / Descargue	39.41	h
% de Tiempo de Cargue / Descargue	40.47	%
% de Clientes atendidos	47.54	%

Fuente propia

Tabla 5. Resultados – Escenario Diurno análisis de sensibilidad

	Horario Diurno			
	Media	Desviación	Intervalo de Confianza (95%)	
			Inferior	Superior
Tiempo Promedio de Operación (h)	12.91	1.28	12.45	13.37
Velocidad Promedio (km/h)	14.34	8.22	11.40	17.28
Velocidad Máxima (Km/h)	25.65	6.01	23.50	27.80
Tiempo de Espera (h)	60.03	66.16	36.36	83.71
%	60.88	12.79	56.31	65.46
Tiempo Cargue / Descargue (h)	39.41	46.34	22.83	55.99
%	40.47	8.09	37.58	43.37
Tiempo de Operación (h)	100.52	112.07	60.42	140.63
Clientes Atendidos	9.16	11.60	5.01	13.31
%	47.54	18.31	40.99	54.09
Numero de Rutas	7.77	8.66	4.68	10.87

Fuente propia

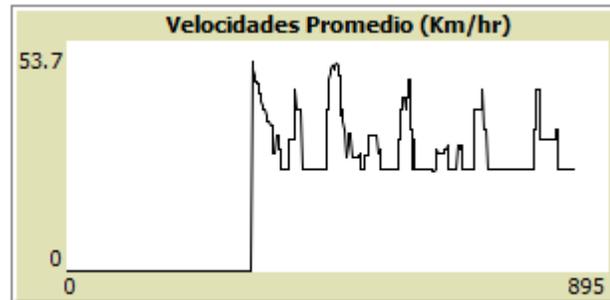
5.4.2 Resultados – Escenario Nocturno

Este escenario representa la dinámica de operación de las empresas una vez se modifique la ventana de operación actual y se migre a una operación en horario nocturno, bajo estas condiciones, los vehículos que realizan las operaciones reducen el impacto directo al que se exponen al operar en horarios en que la infraestructura instalada no se encuentra saturada. Este cambio se ve reflejado en mayores velocidades de recorrido y menores tiempos de operación respecto al horario diurno. Sin embargo, es importante tener en cuenta que desde la perspectiva de los generadores y transportadores, la preparación inicial de los recursos, como capital humano, maquinaria y equipo para atender a los vehículos en horarios no convencionales puede, en algunos casos generar mayores tiempos de atención.

Al estar expuestos a menos cantidad y extensión de las áreas congestionadas en la ciudad, indicadores como la velocidad promedio de recorrido evidencian el positivo impacto en el desempeño de la operación en general.

Para las 10 horas simuladas, se pueden identificar horas valle y horas pico en la operación, en las que las velocidades de recorrido aumentan y disminuyen periódicamente, sin embargo, la variación de las velocidades así como las velocidades promedio son evidentemente mayores en el horario nocturno. Este fenómeno en particular impacta directamente el desempeño de las actividades de distribución, transporte y abastecimiento.

Figura 32. Velocidades promedio – Escenario Nocturno



Fuente propia

Los altos picos en las velocidades alcanzadas por los vehículos, corresponden a los trayectos realizados entre origen y destino, en los que, al existir bajos niveles de congestión, los vehículos pueden moverse más rápidamente.

En términos de tiempos de espera, el modelo muestra que para las operaciones en horario nocturno, en promedio el 55% del tiempo total de operación corresponde a esperar para ser atendido en el generador o el receptor de mercancías.

De la misma forma, los tiempos de atención en las operaciones efectivas de cargue y descargue en promedio alcanzan un 35.7% del tiempo total de operación.

Tabla 6. Resultados – Escenario Nocturno

Indicador	Resultado	Unidad
Tiempo Promedio de Operación	11.15	Horas
Velocidad Promedio	36.71	Km/h
Velocidad Máxima	48.13	Km/h
Tiempo de Espera Total	52.35	h
% de Tiempo de Espera	55.16	%

Tiempo de Cargue / Descargue	44.28	h
% de Tiempo de Cargue / Descargue	35.7	%
% de Clientes atendidos	88.38	%

Fuente propia

Tabla 7. Resultados – Escenario Nocturno análisis de sensibilidad

	Horario Nocturno			
	Media	Desviación	Intervalo de Confianza (95%)	
			Inferior	Superior
Tiempo Promedio de Operación	10.65	0.59	10.06	11.24
Velocidad Promedio (km/h)	33.56	3.56	29.99	37.12
Velocidad Máxima (Km/h)	44.22	1.76	42.45	45.98
Tiempo de Espera (min)	52.37	20.01	32.36	72.38
%	52.76	3.27	49.49	56.03
Tiempo Cargue / Descargue	43.24	20.06	23.18	63.30
%	41.90	2.28	39.62	44.18
Tiempo de Operación	96.58	40.50	56.08	137.08
Clientes Atendidos	17.74	7.80	9.94	25.54
%	81.51	4.25	77.25	85.76
Numero de Rutas	8.62	3.56	5.06	12.18

Fuente propia

5.4.3 Resultados – Comparación de escenarios

Una vez medidos los indicadores de desempeño para los dos escenarios de operación, es posible realizar un análisis comparativo enfocado en identificar los potenciales beneficios de la implementación de la iniciativa en las operaciones de distribución, transporte y abastecimiento en las empresas de la ciudad de Bogotá. La Tabla 8 presenta las variaciones en los indicadores de desempeño definidos para el modelo de simulación.

Para todos los indicadores, el desarrollo de las operaciones en horario nocturno representó una mejoría significativa, siendo especialmente los indicadores de velocidad de recorrido y de porcentaje de clientes atendidos los que mayores mejoras presentan al implementar el cambio de dinámica.

Tabla 8. Resultados – comparativo

Indicador	Mejora relativa	Unidad	Mejora relativa
Tiempo Promedio de Operación	1.76	Horas	15.8%
Velocidad Promedio	22.36	Km/h	60.9%
Velocidad Máxima	22.48	Km/h	46.7%
Tiempo de Espera Total	7.68	H	14.7%
% de Tiempo de Espera	5.72	%	10.4%
Tiempo de Cargue / Descargue	4.87	H	11.0%
% de Tiempo de Cargue / Descargue	3.95	%	7.9%
% de Clientes atendidos	40.83	%	46.2%

Fuente propia

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

Esta investigación da respuesta al objetivo de identificar los impactos que la implementación del cambio de horario en las operaciones tendría para las empresas en zonas congestionadas de la ciudad de Bogotá, reducciones de hasta el 15 % en los tiempos promedios de operación, aumentos en las velocidades de recorrido de hasta el 46%, de los tiempos de espera en hasta 15% y un mejoramiento del 46% en la proporción de clientes atendidos en la ventana horaria establecida, demuestran la efectividad de la iniciativa.

Horarios de cargue y descargue entre las 8 pm y las 6 am han demostrado sus beneficios para sectores como manufactura y comercialización por menor de productos y servicios no esenciales. Grandes superficies, centros comerciales, tiendas de bajo costo, hoteles, bares, manufactura e industria CeDis así como Hidrocarburos, combustibles líquidos, biocombustibles, gas natural, gas licuado de petróleo, importación y exportación de minerales, paquetería son gremios que podrían beneficiarse significativamente de la iniciativa.

En lo que respecta a la pregunta de investigación, el cambio de horario de las operaciones logísticas de abastecimiento impacta de forma positiva en el desempeño logístico de las empresas en zonas urbanas congestionadas, al considerar la posibilidad de operar en un horario que les permita mejorar su competitividad en términos de costos asociados a un ahorro de tiempos, recorridos, y combustible, y contribuyendo de igual forma a la reducción de gases de efecto invernadero y material particulado emitidos al medio ambiente, a los niveles de accidentalidad y al nivel de congestión en general. Sin embargo, es importante tener en cuenta las implicaciones para tener en cuenta para implementar un cargue y descargue en horarios no convencionales: costos adicionales a corto y mediano plazo para

contratar más personal, aplicación de pilotos iniciales, convenios con empresas receptoras y/o generadoras de carga, entre otros.

En el desarrollo de esta investigación se realizó una caracterización sobre las zonas congestionadas de la ciudad con mayor impacto por el transporte de carga. Se identificaron los actores involucrados así como las relaciones presentes entre ellos. Se realizó la caracterización de la generación de viajes en la ciudad, especialmente en las UPZ que tienen vocación comercial e industrial, y presentan los mayores índices de congestión. También se identificó el impacto potencial en dichos actores ante la posibilidad de cambiar el horario de operación de las empresas en la ciudad. A través de un modelo de simulación se evaluó el impacto del cambio de horario en las operaciones de abastecimiento para las empresas ubicadas en las UPZ con mayor congestión, evidenciando mejoras en términos de velocidades de recorrido, índices de atención a los receptores de carga y utilización eficiente de la flota vehicular.

6.2 Recomendaciones

A continuación se presentan las recomendaciones para el desarrollo de trabajos futuros:

- El modelo de simulación puede fortalecerse incluyendo datos de recorridos GPS de flotas de vehículos en la ciudad, esto daría un insumo de información más detallado para la evaluación de impacto propuesta. Adicionalmente, la inclusión de la disposición o no de los actores a cambiar sus dinámicas de operación debido a factores como la seguridad o la inercia natural de ciertos sectores podría ser valioso para mejorar el modelo.
- Las regiones urbanas dinámicas, asequibles, habitables y atractivas como Bogotá nunca estarán libres de congestión. Sin embargo, las políticas de transporte de carga y pasajeros a escala urbana deben tratar de gestionar la congestión de manera rentable con el objetivo de reducir el impacto que la congestión excesiva tiene en los viajeros y los habitantes urbanos en toda la red de carreteras. Esto puede lograrse a través de la promoción de estrategias como la de cargue y descargue en horarios no convencionales, restricciones para vehículos particulares (pico y placa), cargas tributarias para desincentivar el uso del vehículo particular, mejoras en el sistema de transporte masivo, impuestos por congestión, entre otras.

-
- Por otra parte, es importante evaluar la posibilidad de desarrollar esquemas colaborativos entre receptores, transportadores y generadores de carga, con el fin de optimizar las operaciones de cargue, descargue y transporte de carga desde y hacia la ciudad. A través del fortalecimiento de relaciones entre las empresas, es posible identificar buenas prácticas y tomarlas como referencia para desarrollar su estrategia particular.

Bibliografía

- Adarme, W., Sáenz, N., & Invest in Bogotá. (2016). *Piloto de cargue y descargue nocturno en empresas de la ciudad de Bogotá*. 18.
<http://www.andi.com.co/Uploads/Informe>
- Allen, J., Browne, M., Cherrett, T., & McLeod, F. (2008). Review of UK Urban Freight Studies. *Green Logistics*, November.
- Allen, J., Browne, M., Woodburn, A., & Leonardi, J. (2012). The Role of Urban Consolidation Centres in Sustainable Freight Transport. *Transport Reviews*, 32(4), 473–490. <https://doi.org/10.1080/01441647.2012.688074>
- Ambrosini, C., & Routhier, J. L. (2004). Objectives, methods and results of surveys carried out in the field of urban freight transport: An international comparison. *Transport Reviews*, 24(1), 57–77. <https://doi.org/10.1080/0144164032000122343>
- Anderson, S., Allen, J., & Browne, M. (2005). Urban logistics - How can it meet policy makers' sustainability objectives? *Journal of Transport Geography*, 13(1 SPEC. ISS.), 71–81. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.11.002>
- Banco Mundial. (2018). *Logistics Performance Index*. The World Bank.
<https://lpi.worldbank.org/>
- Bertazzo, T., Hino, C., Lobão, T., Tacla, D., & Yoshizaki, H. (2016). Business Case for Night Deliveries in the City of São Paulo during the 2014 World Cup. *Transportation Research Procedia*, 12(June 2015), 533–543.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.009>
- Beutel, M. C., Addicks, S., Zaunbrecher, B. S., Himmel, S., Krempels, K. H., & Ziefle, M. (2015). Agent-based transportation demand management: Demand effects of reserved parking space and priority lanes in comparison and combination. *SMARTGREENS 2015 - 4th International Conference on Smart Cities and Green*

ICT Systems, Proceedings, 317–323. <https://doi.org/10.5220/0005411503170323>

Boerkamps, J. H. K., Van Binsbergen, A. J., & Bovy, P. H. L. (2000). Modeling behavioral aspects of urban freight movement in supply chains. *Transportation Research Record*, 1725(1725), 17–25. <https://doi.org/10.3141/1725-03>

Bogotá cómo vamos. (2019). *Preocupa crecimiento de parque automotor en Bogotá - Bogotá Cómo Vamos*. <https://bogotacomovamos.org/preocupa-crecimiento-de-parque-automotor/>

Brom, M., Holguín-Veras, J., & Hodge, S. (2011). Off-Hour Deliveries in Manhattan, New York City. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2238, 77–85. <https://doi.org/10.3141/2238-10>

Browne, P. M., Sweet, M., Woodburn, A., Allen, J., & Browne, M. (n.d.). *Urban Freight Consolidation Centres Final Report*.

Butrina, P., Del Carmen Girón-Valderrama, G., Machado-León, J. L., Goodchild, A., & Ayyalasomayajula, P. C. (2017). From the last mile to the last 800 ft: Key factors in urban pickup and delivery of goods. *Transportation Research Record*, 2609(1), 85–92. <https://doi.org/10.3141/2609-10>

Cámara de Comercio de Bogotá. (2020a). *¿Qué son las Unidades de Planeamiento Zonal (UPZ)?* <https://www.ccb.org.co/Preguntas-frecuentes/Transformar-Bogota-Articulacion-publico-privada/Desarrollo-Urbano-y-Regional/Que-son-las-Unidades-de-Planeamiento-Zonal-UPZ>

Cámara de Comercio de Bogotá. (2020b). *Movilidad - Observatorio*. <https://www.ccb.org.co/observatorio/Region/Region-ordenada-conectada-y-sostenible/Movilidad>

CEPAL. (2003). *Congestión de Tránsito, el problema y cómo enfrentarlo*. www.cepal.org/es/suscripciones

Chen, I. J., & Paulraj, A. (2004). Towards a theory of supply chain management: The constructs and measurements. *Journal of Operations Management*, 22(2), 119–150. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2003.12.007>

- Christopher, M. (2005). *Supply Chain Management*. August, 1–222.
- CLUB DÉCIBEL VILLES. (2013). *Synthèse Pour mieux livrer , livrons la nuit , mais sans bruit*. 1–7.
- Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP). (2013). *SCM Definitions and Glossary of Terms*.
- Creswell, J. W. (2009). Research Design: Qualitative, Quantitative and Mixed Approaches. In *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. <https://doi.org/10.2307/1523157>
- Cui, J., Dodson, J., & Hall, P. V. (2015). Planning for Urban Freight Transport: An Overview. *Transport Reviews*, 35(5), 583–598. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1038666>
- Dablanc, L., Giuliano, G., Holliday, K., & O'Brien, T. (2013). Best Practices in Urban Freight Management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2379(1), 29–38. <https://doi.org/10.3141/2379-04>
- DANE. (2019). *Cuentas Nacionales*.
- Dasburg, N., & Schoemaker, J. (2006). *Best Urban Freight Solutions II - Quantification of Urban Freight Transport Effects II*.
- de Palma, A., Kilani, M., & Lindsey, R. (2005). Congestion pricing on a road network: A study using the dynamic equilibrium simulator METROPOLIS. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 39(7–9), 588–611. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2005.02.018>
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Encuesta Nacional Logística 2018*.
- Doig, J. W. (2001). *Empire on the Hudson : entrepreneurial vision and political power at the Port of New York Authority*. Columbia University Press.
- Donnelly, R., Wigan, M., & Thompson, R. (2010). *A hybrid microsimulation model of urban freight travel demand*.
- Forkert, S., & Eichhorn, C. (2007). Innovative Approaches in City Logistics - Inner-city Night Delivery. In *Niches - Sixth Framework Programme*.

- Fu, J., & Jenelius, E. (2018). Transport efficiency of off-peak urban goods deliveries: A Stockholm pilot study. *Case Studies on Transport Policy*, 6(1), 156–166.
<https://doi.org/10.1016/j.cstp.2018.01.001>
- Green, K. W., Whitten, D., & Inman, R. A. (2008). The impact of logistics performance on organizational performance in a supply chain context. *Supply Chain Management*, 13(4), 317–327. <https://doi.org/10.1108/13598540810882206>
- Habibian, M., & Kermanshah, M. (2011). Exploring the role of transportation demand management policies' interactions. *Scientia Iranica*, 18(5), 1037–1044.
<https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.09.005>
- Hmida, F. Ben, Séguy, A., & Dupas, R. (2012). MultiAgent Simulation and Evaluation of Supply Chain Control Architectures. *{IFAC} Proceedings Volumes*, 45(6), 781–786.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3182/20120523-3-RO-2023.00218>
- Holguín-Veras, J., & Aros-Vera, F. (2014). Geographically Focused Incentives to Foster Off-Hour Deliveries. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2411, 27–33. <https://doi.org/10.3141/2411-04>
- Holguín-Veras, J., & Aros-Vera, F. (2015). Self-supported freight demand management: pricing and incentives. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 4(2), 237–260. <https://doi.org/10.1007/s13676-013-0041-1>
- Holguín-Veras, J., Campbell, S., Kalahasthi, L., Wang, C., Holguín-Veras, J., Campbell, S., Kalahasthi, L., & Wang, C. (2016). Role and potential of a trusted vendor certification program to foster adoption of unassisted off-hour deliveries. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.09.011>
- Holguín-Veras, J., Encarnación, T., González-Calderón, C. A., Winebrake, J., Wang, C., Kyle, S., Herazo-Padilla, N., Kalahasthi, L., Adarme, W., Cantillo, V., Yoshizaki, H., & Garrido, R. (2018). Direct impacts of off-hour deliveries on urban freight emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61(August 2019), 84–103. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.013>
- Holguín-Veras, J., Ozbay, K., de Cerreño, A., Professor Associate Professor Co-Director,

- A., & Center, R. (2005). *Evaluation Study of Port Authority of New York and New Jersey's Time of Day Pricing Initiative*.
- Holguín-Veras, J., Ozbay, K., Kornhauser, A., Brom, M., Iyer, S., Yushimito, W., Ukkusuri, S., Allen, B., & Silas, M. (2011). Overall Impacts of Off-Hour Delivery Programs in New York City Metropolitan Area. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2238, 68–76. <https://doi.org/10.3141/2238-09>
- Holguin-Veras, J., & Polimeni, J. (2006). POTENTIAL FOR OFF-PEAK FREIGHT DELIVERIES TO CONGESTED URBAN AREAS. In *Rensselaer Polytechnic Institute*.
- Holguín-Veras, J., Polimeni, J., Cruz, B., Xu, N., List, G., Nordstrom, J., & Haddock, J. (2005). Off-peak freight deliveries : Challenges and stakeholders' perceptions. *Transportation Research Record*, 1906(1906), 42–48. <https://doi.org/10.3141/1906-05>
- Holguín-Veras, J., & Sánchez-Díaz, I. (2016). Freight Demand Management and the Potential of Receiver-Led Consolidation programs. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.06.013>
- Holguín-Veras, J., Silas, M., Polimeni, J., & Cruz, B. (2008). An investigation on the effectiveness of joint receiver-carrier policies to increase truck traffic in the off-peak hours. Part II: The behavior of carriers. *Networks and Spatial Economics*, 8(4), 327–354. <https://doi.org/10.1007/s11067-006-9011-6>
- Holguín-Veras, J., Wang, C., Browne, M., Hodge, S. D., & Wojtowicz, J. (2014). The New York City Off-hour Delivery Project: Lessons for City Logistics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125, 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1454>
- Holguín-Veras, J., Wang, X. (Cara), Sánchez-Díaz, I., Campbell, S., Hodge, S., Jaller, M., & Wojtowicz, J. (2017). Fostering unassisted off-hour deliveries: The role of incentives. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 102, 172–187. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2017.04.005>
- Holguin-Veras, J., Wojtowicz, J., Wang, X. (Cara), Jaller, M., Ban, X., Aros, F., Campbell, S., Yang, X., Sanchez-Diaz, I., Amaya-Leal, J., Gonzales-Calderon, C., & Marquis, R. (2013). *Integrative Freight Demand Management in the New York City*

Metropolitan Area.

- IDU. (2019). *Diagnóstico de Pavimentos de la Malla Vial Rural de Bogotá D.C. 2018* .
<https://idu.maps.arcgis.com/apps/Cascade/index.html?appid=ac7efa92e5784d33ab99425fd42f74d4>
- INRIX. (2018). *Scorecard - INRIX*.
- Insti-, R. P., Departmentofcivil, R., Locker, F., & Food, W. R. (n.d.). *The latest Manhattan project uses incentives to get freight off streets during peak hours*.
- Kherbach, O., & Liviu Mocan, M. (2016). The Importance of Logistics and Supply Chain Management in the Enhancement of Romanian SMEs. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 221(7), 405–413.
- Li, Z. A. N. (2015). *The Efficiency of Off-peak Deliveries in Stockholm City The Efficiency of Off-peak Deliveries*.
- Luis, J., Ibeas, A., Cordera, R., & Holguin-veras, J. (2015). Receivers ' willingness-to-adopt novel urban goods distribution practices. *Urbe 2015*, 1–17.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.10.026>
- Mason, R., & Lalwani, C. (2006). Transport integration tools for supply chain management. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 9(1), 57–74. <https://doi.org/10.1080/13675560500534599>
- McPhee, J., Paunonen, A., Ramji, T., & Bookbinder, J. H. (2015). Implementing off-peak deliveries in the Greater Toronto Area: Costs, benefits, challenges. *Transportation Journal*, 54(4), 473–495. <https://doi.org/10.5325/transportationj.54.4.0473>
- Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). DEFINING SUPPLY CHAIN MANAGEMENT. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1–25. <https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x>
- MinTransporte. (2019). *Portal Logístico de Colombia*.
- Morash, E. A., & Clinton, S. R. (1997). The role of transportation capabilities in international supply chain management. *Transportation Journal*, 36(3), 5–17.
<https://doi.org/10.2307/20713314>

- Policía Nacional. (2019). *Políticas misionales institucionales*.
<https://www.policia.gov.co/planeacion-politicas/politicas-misionales-institucionales>
- Quak, H. (2008). Sustainability of urban freight transport - Retail Distribution and Local Regulations in Cities. In *Erasmus Research Institute of Management (ERIM)*.
<http://www.irim.eur.nl>
- Roorda, M. J., Cavalcante, R., McCabe, S., & Kwan, H. (2010). A conceptual framework for agent-based modelling of logistics services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(1), 18–31.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.06.002>
- Rühl, F., & Boltze, M. (2016). Freight transport demand management: Influencing the freight transport demand within traffic management. In *Dynamic and Seamless Integration of Production, Logistics and Traffic: Fundamentals of Interdisciplinary Decision Support* (pp. 163–184). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-41097-5_9
- Sánchez-Díaz, I., Georén, P., & Brolinson, M. (2017). Shifting urban freight deliveries to the off-peak hours: a review of theory and practice. *Transport Reviews*, 37(4), 521–543. <https://doi.org/10.1080/01441647.2016.1254691>
- Schöder, D., Ding, F., & Campos, J. K. (2016). The Impact of E-Commerce Development on Urban Logistics Sustainability. *Open Journal of Social Sciences*, 04(03), 1–6.
<https://doi.org/10.4236/jss.2016.43001>
- Secretaría Distrital de Desarrollo Económico. (2019). *Informe de Importaciones*.
<http://www.desarrolloeconomico.gov.co/>
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2017). *Funciones y Deberes*.
https://www.movilidadbogota.gov.co/web/Funciones_deberes
- Secretaría Distrital de Movilidad. (2019). *Actualización matriz origen-destino Bogotá*.
https://www.simur.gov.co/portal-simur/wp-content/uploads/2019/files/datos-abiertos/documentos/observatorio/5.Capitulo4_Transporte_de_Carga-min.pdf
- Secretaría Distrital de Planeación. (2016a). *Unidad de Planeamiento Zonal No. 102 La Sabana*. <http://www.sdp.gov.co/gestion-territorial/norma-urbana/normas->

urbanisticas-vigentes/upz/unidad-de-planeamiento-zonal-no-102-la-sabana

- Secretaría Distrital de Planeación. (2016b). *Unidad de Planeamiento Zonal No. 111 Puente Aranda*. <http://www.sdp.gov.co/gestion-territorial/norma-urbana/normas-urbanisticas-vigentes/upz/unidad-de-planeamiento-zonal-no-111-puente-aranda>
- Secretaría Distrital de Planeación. (2016c). *Unidad de Planeamiento Zonal No. 94 La Candelaria*. <http://www.sdp.gov.co/gestion-territorial/norma-urbana/normas-urbanisticas-vigentes/upz/unidad-de-planeamiento-zonal-no-94-la-candelaria>
- Silas, M. A., Holguín-Veras, J., & Jara-Díaz, S. (2012). Optimal distribution of financial incentives to foster off-hour deliveries in urban areas. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(8), 1205–1215. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.05.015>
- Smajgl, A., & Barreteau, O. (2014). *Empirical Agent-Based Modelling - Challenges and Solutions*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6134-0>
- Smart Growth Network, International City/County Management Association, & U.S. Environmental Protection Agency. (2002). Getting to Smart Growth: 100 Policies for Implementation. *Development*, 104.
- Tamagawa, D., Taniguchi, E., & Yamada, T. (2010). Evaluating city logistics measures using a multi-agent model. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6002–6012. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2010.04.014>
- Taniguchi, E., Thompson, R. G., & Yamada, T. (2012). *Emerging techniques for enhancing the practical application of city logistics models*. 39, 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.03.087>
- Taniguchi, E., Thompson, R. G., & Yamada, T. (2016). New Opportunities and Challenges for City Logistics. *Transportation Research Procedia*, 12, 5–13. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.02.004>
- Teo, J. S. E., Taniguchi, E., & Qureshi, A. G. (2014). Multi-agent systems modelling approach to evaluate urban motorways for city logistics. *International Journal of Urban Sciences*, 18(2), 154–165. <https://doi.org/10.1080/12265934.2014.929020>
- Torrentellé, M., & Moraiti, D. T. P. (2012). *ELICITATION OF THE GOOD PRACTICES*

ON URBAN FREIGHT TRANSPORT.

Transport for London. (2013). *Delivering Servicing Plans*.

Tseng, Y., Yue, W. L., & Taylor, M. A. P. (2005). The Role of Transportation in Location. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, 1657–1672. <https://doi.org/10.4159/harvard.9780674494268.c18>

United Nations. (2014). World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352). In *New York, United*. <https://doi.org/10.4054/DemRes.2005.12.9>

Verlinde, S., Debauche, W., Heemeryck, A., Macharis, C., Van Hoeck, E., & Witlox, F. (2010). Night-time delivery as a potential option in belgian urban distribution : a stakeholder. *12th WCTR*, 2–21.

Vilain, P., & Wolfrom, P. (2000). Value Pricing and Freight Traffic: Issues and Industry Constraints in Shifting from Peak to Off-Peak Movements. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1707, 64–72. <https://doi.org/10.3141/1707-08>

Wangapisit, O., Taniguchi, E., Teo, J. S. E., & Qureshi, A. G. (2014). Multi-agent Systems Modelling for Evaluating Joint Delivery Systems. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 125, 472–483. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.1489>

World Bank. (2018). Estudio de la urbanización en Centroamérica: Oportunidades de una Centroamérica urbana. In *Estudio de la urbanización en Centroamérica: Oportunidades de una Centroamérica urbana*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1220-0>

Zhao, B., Kumar, K., Casey, G., & Soga, K. (2019). *Agent-Based Model (ABM) for City-Scale Traffic Simulation: A Case Study on San Francisco*. 2019, 203–212. <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.203>

7. Anexo 1. Protocolo ODD

A manera de resumen y haciendo uso del protocolo “Overview, Design concepts and Details” o protocolo ODD, a continuación, se presentan las características principales de la construcción y funcionamiento del modelo de simulación basado en agentes que fue usado para el desarrollo de esta investigación.

7.1 Descripción general

7.1.1 Propósito

Simular las operaciones logísticas de empresas generadoras, receptoras y transportadoras de carga en la ciudad de Bogotá, con el fin de evaluar el impacto del cambio de horario en el que se realizan dichas operaciones en su desempeño logístico.

7.1.2 Entidades, variables y escalas

Generadores: Agentes responsables de la generación de carga en la ciudad. De acuerdo con la información recopilada, se tiene en cuenta información de 134 empresas en esta categoría.

Receptores: Agentes que reciben la carga en la ciudad. Se incluyen establecimientos de comercio. En el modelo se tienen en cuenta las características de 223 empresas.

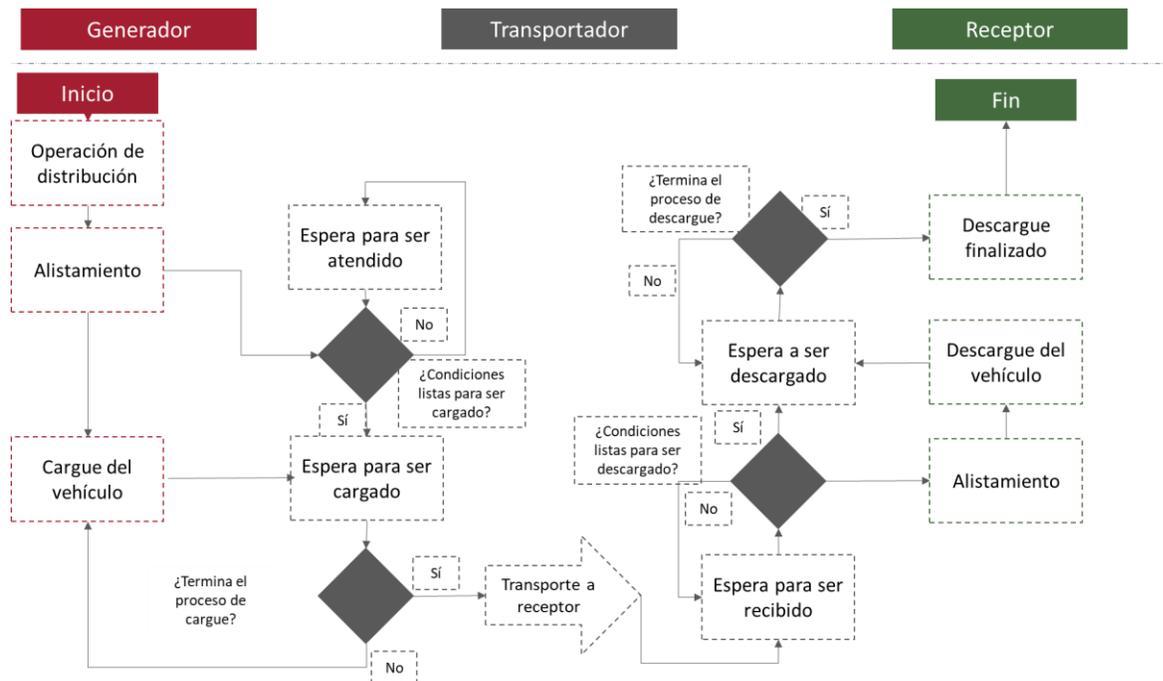
Transportadores: Agentes responsables del transporte de carga en la ciudad. Para la construcción del modelo se tiene en cuenta la información recopilada de 55 transportistas.

Espacio para la simulación Se representa en una cuadrícula de 600 por 300 en donde cada uno de los espacios representa 200m. En total, la máxima distancia que un agente transportador puede recorrer es de 120km lo que representaría aproximadamente 4 viajes

de extremo norte a sur de la ciudad de Bogotá y es suficiente para simular los viajes de distribución generados por las empresas.

Áreas congestionadas Círculos concéntricos que representan las zonas de alta congestión de la ciudad; alrededor de estos, se crean áreas de mediana congestión. La cantidad y la extensión de estas áreas es una de las variables modificables del modelo.

7.1.1 Proceso



7.2 Conceptos de diseño

7.2.1 Antecedentes teóricos y empíricos

La revisión de la literatura presentada anteriormente demuestra las ventajas teóricas del cambio de horario de operación para las empresas en zonas congestionadas. Así mismo, las experiencias nacionales en torno a los pilotos de cargue y descargue nocturno en la ciudad de Bogotá, sugieren que la eficiencia logística que puede alcanzarse al implementar programas de entregas en horarios no convencionales significa una importante oportunidad de mejoramiento en los niveles de competitividad.

7.2.2 Decisiones individuales

En el modelo, el generador de carga es el agente tomador de decisiones, en cuanto al envío o no de vehículos para la entrega de mercancías en un horario establecido. Así mismo, guiado por los parámetros de entrada, asigna a cada uno de los vehículos un número determinado de puntos de entrega en la ciudad.

7.2.3 Escaneo individual del entorno

Los transportadores, agentes encargados de la movilización de mercancías entre los generadores y los receptores, cuentan con capacidades para escanear el entorno y tomar decisiones relacionadas con la velocidad de movimiento y tiempo de espera tanto en el generador de carga como en cada uno de los receptores asignados.

7.2.4 Interacción

Las interacciones dentro del modelo definen las relaciones entre generadores y transportadores: asignando rutas y número de clientes, además de definir los tiempos de espera para el cargue de mercancías y el tiempo de cargue efectivo; posteriormente, la interacción se materializa entre transportadores y entorno, al ser las zonas delimitadas como congestionadas o no, las que permiten aumentar o disminuir la velocidad de recorrido de los vehículos; finalmente la interacción entre transportador y receptor de carga define los tiempos de espera para el descargue y el tiempo efectivo de descargue.

7.2.5 Observación

7.3 Datos de entrada

Asignación de rutas: Para cada generador de carga, se asigna un número de rutas que sigue una distribución de **probabilidad empírica** que encaja con los resultados de la encuesta realizada, así 52% de los vehículos, realizan solo un viaje diario, 80% dos o menos viajes y el 97% 5 o menos viajes al día. Tan solo el 3% de los vehículos lleva a cabo más de 5 viajes al día.

Número de viajes diarios	%
1	26%

2	24%
3	11%
4	7%
5	7%
6	4%
7 a 25	19%
25 o más	2%

Creación de los receptores: Para cada ruta de entregas creada en los transportadores de carga se crea y ubica un número de receptores de carga que deberán ser atendidos por los transportadores. De nuevo, esta creación responde a una distribución de probabilidad relacionada con las necesidades identificadas en las encuestas realizadas. Una distribución uniforme entre 1 y 4 representando las paradas programadas para cada ruta.

Tiempos de espera y operación: Se definen tiempos asociados a cuatro etapas del proceso, el tiempo de espera para iniciar el cargue y la duración de la operación de cargue para los generadores, así como el tiempo de espera para empezar el descargue y el tiempo de duración del mismo para los receptores siguiendo una distribución normal diseñada a partir de los resultados de la encuesta nacional logística 2018

	Diurno		Nocturno	
	Media	Desviación	Media	Desviación
Espera Cargue	228 min	53 min	89 min	21 min
Tiempo Cargue	156 min	36 min	61 min	14 min
Espera Descargue	216 min	50 min	172 min	40 min
Tiempo Descargue	156 min	46 min	158 min	36 min