

**ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA
LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS**

AUTOR:

JOAN MANUEL ULLOA MURCIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2015

**ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA
LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS**

AUTOR:

JOAN MANUEL ULLOA MURCIA

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero industrial**

Director

JAVIER ARIAS OSORIO

Ingeniero Industrial MS.c

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2015

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. OBJETIVOS DEL PROYECTO	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	17
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
4. MARCO TEÓRICO	19
4.1 ESTADO DEL ARTE	19
4.2 LOGÍSTICA	22
4.3 LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS	24
4.3.1 Actores de la logística urbana de mercancías	26
4.3.2 Objetivos de la logística urbana de mercancías	36
4.3.3 Recursos de la logística urbana de mercancías	39
4.3.4 Actividades de la logística urbana de mercancías	40
4.3.5 Problemas de la logística urbana de mercancías	41
4.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN	45

4.4.1 Investigación de operaciones.....	45
4.4.2 Modelo Matemático.....	46
4.4.3 Optimización	47
5. DESARROLLO METODOLÓGICO.....	49
5.1 INTRODUCCIÓN CONCEPTUAL DE LA TEMÁTICA	49
5.2 FASE HEURISTICA.....	50
5.2.1 Registro anual de publicaciones	51
5.2.2 Tendencias de la logística urbana de mercancías	51
5.2.3 Países líderes en publicaciones.....	53
5.2.4 Autores y revistas líderes en publicaciones	54
5.2.5 Clasificación de la información.....	55
5.3 FASE HERMENÉUTICA	56
5.4 FASE DE CONCLUSIÓN.....	57
5.5 ELABORACIÓN DEL ARTÍCULO DE CARÁCTER PUBLICABLE	57
6. ESTADO DEL ARTE.....	58
6.1 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA URBANA A NIVEL ESTRATÉGICO	58
6.1.1 Modelos de predicción de la demanda en la logística urbana de mercancías	58
6.1.2 Modelos de decisiones de inversión en la logística urbana de mercancías ..	61
6.1.3 Modelos de optimización para la localización de facilidades logísticas	63

6.2 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN TÁCTICOS Y OPERACIONALES DE LA LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS	68
6.2.1 Modelos de programación para optimización de la capacidad.....	70
6.2.2 Modelos de programación para optimización de la cantidad de vehículos ...	72
6.2.3 Modelos de programación para optimización del backhaul.....	74
6.2.4 Modelos de programación con variables estocásticas	76
6.2.5 Modelos de programación dinámicos.....	78
6.2.6 Modelos de programación verdes	83
7. LATINOAMÉRICA.....	87
7.1 BRASIL	88
7.2 MÉXICO	92
7.3 OTROS	95
8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	98
BIBLIOGRAFIA	101
ANEXOS	116

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Objetivos según actores de la logística urbana.	38
Tabla 2. Ranking palabras claves.....	52
Tabla 3. Ranking áreas de investigación.....	53
Tabla 4. Ranking países líderes	53
Tabla 5. Ranking de publicaciones.....	54
Tabla 6. Ranking autores.....	55

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Agentes y relaciones en la logística urbana de mercancías.	41
Figura 2. Metodología para el estado del arte.....	49
Figura 3. Clasificación información recolectada.	56

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Resultado de la búsqueda.....	116
Anexo B. Tabla problemas de la logística urbana de mercancías	117
Anexo C. Tabla recopilatoria de artículos.....	119
Anexo D. Artículo científico	120

ABREVIATURAS

ACO: *Ant Colonization Optimization*. Optimización basada en colonización de hormigas.

CARPDD: *Capacitated arc routing problem with deadheading demands*. Problema de ruteo de arcos con cambios de demanda.

DCVRP-B: *Disrupted Capacitated Vehicle Routing Problem with vehicle Breakdown*. Programación de ruta con avería en vehículos.

DNDP: *Discrete Network Design Problem*. Problema discreto de diseño de redes

DUM: Distribución urbana de mercancías.

DVRP: *Dynamic Vehicle Routing problem* Problema de ruteo de vehículo dinámico

EDI: *Electronic Data Interchange*. Intercambio electrónico de información.

GIS: *Geographic information system*. Sistema de información geográfica.

GLS: *Genetic Local Search*. Búsqueda local genética.

GPS: *Global Positioning System*. Sistema global de navegación por satélite.

ITS: *Intelligent Transport Systems*. Sistemas inteligentes de transporte.

LS: *Local Search*. Búsqueda local.

MOORA: *Multiobjective Optimization ratio analysis*. Optimización multiobjetivo basada en análisis de radio

PEMS: *Portable Emissions Measurement Systems*. Sistemas de medición de emisiones portátiles

PRP: *Pollution routing problem*. Problema de ruteo contaminante.

TOPSIS: *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution.* Técnica de selección según cercanía a la solución ideal.

VRP: *Vehicle Routing Problem.* Problema de ruteo de vehículo.

VRPMMH-FWA: *Vehicle Routing Problem with Manual Material Handling with Flexible Work Assignment.* Problema de ruteo con fuerza de trabajo flexible.

VRPSDP: *Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pickups.* Problema de ruteo con entrega y recolección simultánea.

RESUMEN

TITULO: ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS. *

AUTOR: JOAN MANUEL ULLOA MURCIA**

PALABRAS CLAVE: Logística urbana de mercancías, Distribución de mercancías, modelos de optimización, estado del arte, programación de vehículos.

DESCRIPCIÓN:

La logística urbana de mercancías se centra en la distribución de bienes dentro de las ciudades para el aprovisionamiento a establecimientos empresariales o directamente a los consumidores finales, el transporte de la mercancía tiene repercusiones negativas en el tráfico y contaminación en las ciudades. Una buena gestión de la logística urbana de mercancías se verá reflejada en una disminución del tráfico, emisión de gases contaminantes, costos y tiempos de transporte, y una mejora en la calidad de vida de ciudadanos y crecimiento económico de la ciudad.

El presente estado del arte hace una conceptualización de temas como estado del arte, logística urbana y modelos de optimización. Además presenta una revisión bibliográfica de la base de datos *ISI WEB OF KNOWLEDGE* realizado con el software para explotación minera de datos *VANTAGE POINT* que identifica tendencias, países, autores y publicaciones líderes en temas relacionados con la logística urbana. El estado del arte es construido con artículos que describen modelos de optimización que se han desarrollado para la logística urbana de mercancías a partir del 2004, que incluyen diferentes ámbitos como la predicción de la demanda, inversión en infraestructura, localización de facilidades logísticas y modelos de VRP.

Se dedica un capítulo independiente al análisis de la logística urbana de mercancías en Latinoamérica, que recopila modelos, estudios y políticas desarrolladas en la región. Finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones para futuras líneas de investigación basados en la revisión hecha.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.
Director: Javier Eduardo Arias Osorio.

ABSTRACT

TITLE: STATE OF THE ART OF OPTIMIZATION MODELS FOR CITY LOGISTICS.*

AUTHOR: JOAN MANUEL ULLOA MURCIA**

KEYWORDS: City logistics, Freight distribution, Optimization model, state of the art, Vehicle Routing Problem.

DESCRIPTION:

City logistics focuses on goods distribution inside the cities to supply business or customers; this freight transport has a negative impact on traffic, pollution and road safety on cities. Good management of city logistics will reduce traffic, Green house emission, transportation costs and times, and an improvement on quality life of the citizens and economic development of the city.

This document shows a conceptualization of topics like state of the art, city logistics and optimization models. It also presents a bibliographic review based on ISI WEB OF KNOWLEDGE database with the help of the software for data mining exploitation VANTAGE POINT that identifies trends, countries, authors and magazines leaders on issues related to city logistics. The state of the art summaries optimization models developed for city logistics since 2004, it includes demand prediction, financial evaluation, logistic facilities location and vehicle routing problem models.

A chapter focuses on the situation of city logistics in Latin America in countries such as Brazil, Colombia, Mexico, Peru, Chile and Ecuador. It collects optimization models, studies and politics created on the region. Finally conclusions and recommendations are presented for future investigations related to urban logistic optimization models; these are based on gaps and trends of the theory, found on the research.

* Bachelor thesis.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales.
Director: Javier Eduardo Arias Osorio.

INTRODUCCIÓN

Considerando la evolución que se ha presentado en el concepto de ciudad, que hoy día se perciben como una unidad de negocio para la administración pública, y se ayuda de ciertos principios empresariales para satisfacer las necesidades de sus ciudadanos, que adquieren el papel de clientes, es necesario incluir la logística en la administración de las ciudades, pues ésta es la que se encarga del flujo eficaz de personas, mercancías e información, especialmente de la logística urbana de mercancías, la cual se centra en la distribución de bienes dentro de las ciudades para el aprovisionamiento a establecimientos empresariales o directamente a los consumidores finales.

Una ciudad que aplique principios de logística urbana de mercancías en su administración verá un impacto positivo en la disminución del tráfico, emisión de gases contaminantes, calidad de vida de sus ciudadanos, disminución de costos de transporte y tiempo en la distribución de mercancías de las industrias, aumentado de esta forma su nivel de servicio. Dado el beneficio mutuo que se da al tener un control en la logística urbana de mercancías entre el sector público y privado, es importante que unan esfuerzos para desarrollar una legislación que regule la distribución de las mercancías dentro de las ciudades.

Para un mejor control de la distribución urbana de mercancías, es pertinente iniciar una revisión de la literatura del tema, construyendo una recopilación de información acerca de los modelos de optimización que puedan ser aplicados al sector industrial y a la administración de las ciudades, mediante la creación de un documento que sirva como base para futuras investigaciones.

1. OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

Construir un estado del arte de modelos de optimización en logística urbana de mercancías, obteniendo un análisis detallado de la evolución, tratamiento actual y tendencias del tema con el fin de identificar futuras oportunidades de investigación.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar la conceptualización de los aspectos relacionados con la temática planteada.
2. Realizar una revisión de la literatura sobre modelos de optimización en logística urbana de mercancías.
3. Analizar los resultados de la revisión, clasificando e integrando los diferentes avances, planteamientos, propuestas y desarrollos relacionados con la temática investigada.
4. Enmarcar el análisis de la revisión de la literatura al contexto latinoamericano.
5. Elaborar un artículo publicable sobre el tema investigado.

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Con la intención del grupo OPALO de expandir su espectro de investigación en temáticas logísticas puntuales y de actualidad, y con el problema planteado, se hace necesario el desarrollo de un estado del arte, pues como dice Molina , esta modalidad de investigación permite el estudio del conocimiento acumulado dentro de un área específica, en este caso de la logística urbana de mercancías, dejando como producto un documento que resume y organiza los resultados de una investigación de manera que integra y agrega claridad a un tema específico, generando así un aporte al conocimiento, que orientarán a la postre futuras investigaciones al interior del grupo.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Factores como la globalización, el aumento de la población en las ciudades y de la actividad económica en estas ha hecho cada vez más complejo el manejo de la logística urbana de mercancías, es entonces necesario entender claramente la mejor forma de gestionar esta logística, mejorando la sinergia entre los actores principales de esta (administración pública, acreedores de servicios logísticos y la demanda de servicios logísticos) de tal forma que se vea reflejado en una mejora de la calidad de vida de los ciudadanos, disminución de la congestión y mejoramiento del tejido empresarial de la ciudad.

Dado que todas las ciudades tienen diferentes características, no es posible dar una solución única al problema de la logística urbana de mercancías, por lo cual se hace necesario la construcción de un documento recopilatorio de información pertinente (al menos 50 referencias), a partir de la interpretación y síntesis de la misma, para sentar bases a futuras investigaciones que generen actuaciones específicas para brindar soluciones a casos concretos.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 ESTADO DEL ARTE

El estado del arte es un documento que resume y organiza los resultados de una investigación, fruto del estudio del conocimiento acumulado de un tema específico. Su uso se remonta al siglo XIX, cuando era conocido como “*status of the art*”, término que describía la condición o nivel en el momento de un arte técnico, su alcance fue creciendo y en el siglo XX la expresión fue modificada a “*state of the art*”, como se le conoce actualmente y se refería al conocimiento disponible acerca de un tópico particular. En la década de los 80 el estado del arte se populariza como una herramienta para compilar y sistematizar información en el ámbito de las ciencias sociales, que usaron esta modalidad de investigación como apoyo para el conocimiento de tendencias y la toma de decisiones relacionadas con las políticas para el desarrollo social.

El estado del arte es considerado una de las primeras etapas de una investigación porque permite determinar cómo ha sido tratado el tema, cómo se encuentra al momento de realizar la investigación, tendencias y vacíos, los cuales presentan la posibilidad de contribuir a la teoría y práctica del problema abordado mediante nuevas investigaciones. Martínez y Vargas¹ destacan el papel actual que juega el estado del arte, debido a la gran cantidad de conocimiento al que se tiene acceso, también tiene la finalidad de contrarrestar los efectos de la dispersión y fragmentación de la información, manteniendo así el conocimiento actualizado, y socializando experiencias e innovaciones del tópico que merecen ser difundidas y permanecen en el anonimato.

¹ MARTINEZ, Elba y VARGAS, Marta. La investigación sobre la educación superior en Colombia. ICFES. 2002.

Molina² resalta que al ser un estudio sistemático, sin importar su abordaje, es necesario establecer una metodología para el desarrollo del estado del arte, una general y comúnmente usada en este tipo de trabajos tiene 3 fases:

a. Fase heurística:

Etapa de búsqueda donde se recopilan documentos que representan el saber acumulado sobre el tema, es necesario tener una porción substancial de la literatura existente del tema, para con su posterior análisis obtener una madurez suficiente que permita explicar a otros el problema investigado.

En esta etapa de búsqueda se presentan los siguientes pasos: el primero es la “iniciación”, en el cual se detecta la carencia de conocimiento o comprensión de un área, seguido a esto se hace la “selección” donde se identifica el tópico general a ser investigado, en este paso es necesario asegurarse que el tema escogido tenga alto nivel de material para investigar para poder asegurar el resultado de un artículo bien fundamentado, seguido se realiza una “exploración” para comprender el problema, con base en ese análisis se hace una idea o “formulación” con más juicio acerca de la problemática y finalmente se ejecuta la “recolección”, momento en el cual se acopla la información pertinente sobre el tema.

En la recolección se debe establecer un proceso de búsqueda para encontrar información que tenga alta probabilidad de ser útil. Gallo³ recomienda acotar la búsqueda si resulta provechoso, limitándola geográficamente a información proveniente o basada en un lugar específico o temporalmente, determinando si va a ser un estudio sincrónico (que solo usa fuentes con fecha próxima al momento de realizar la investigación) o diacrónico (usa fuentes desde su surgimiento hasta desarrollos actuales).

² MOLINA, Nancy. ¿qué es el estado del arte?. En: Ciencia y Tecnología para la salud visual y ocular. julio 2005 Vol 5. P 74,75.

³ GALLO, Nancy. Taller: diseño del estado del arte en ciencias de la salud, humanas y sociales. Universidad de Antioquia.

b. Fase hermenéutica:

Momento de leer, analizar, interpretar y clasificar las fuentes recolectadas, etapa clave para lograr el objetivo del estado del arte de alcanzar un conocimiento crítico y comprensible basado en fuentes secundarias para realizar una interpretación del fenómeno en cuestión por parte del investigador que permita un avance del conocimiento sobre la temática. De este análisis deben salir unos puntos fundamentales que sirvan como instrumentos para sistematizar la información, por medio de una categorización que facilite el estudio de los documentos. Este método heurístico busca tener la información actualizada pues está realizando constantes miradas al asunto de la investigación, mejorar comprensiones, enriquecer puntos de vista y ampliar las perspectivas para el análisis.

c. Fase de análisis:

Etapa de reflexión sobre el tema estudiado, para expresar algo nuevo a lo que se ha dicho hasta el momento del fenómeno estudiado es esencial tener un dominio amplio del área, tener claras las perspectivas y tendencias, generar resultados que sean aplicables y transferibles al entorno y plantear un mejoramiento de la teoría existente para aportar el nuevo conocimiento.

Al momento de la construcción del estado del arte se debe revisar que integre de forma novedosa y consecuente la documentación disponible, agregue claridad al campo, tenga carácter crítico, no solo describiendo el problema sino explicándolo de forma que renueve y amplíe el conocimiento, interpretativo, flexible de forma que considere las emergentes que se puedan presentar en la fase hermenéutica, conclusivo y con capacidad de trascendencia.

Para su redacción se sugiere leer otros estados del arte para saber cómo escribirlo, usar un lenguaje claro y conciso y la terminología técnica de manera apropiada, pues esta tiene significados muy concretos, y unos encabezados claros que ayuden a la buena organización del texto.

4.2 LOGÍSTICA

La logística es un proceso estratégico que busca planificar, implementar y controlar todas las actividades necesarias de un bien o servicio desde su origen hasta que llega al consumidor. Los incesantes cambios en el entorno han demandado a la logística una evolución constante, y la han convertido en un elemento cada vez más importante para la competitividad de las empresas.

Su origen se da en el ejército, donde se consideraba la logística como el suministro de bienes requeridos en tiempo, lugar y forma para el cumplimiento de manera eficiente de las actividades encomendadas. De ahí se empieza a aplicar el concepto en ámbitos empresariales donde su función principal era controlar el flujo físico de materiales, sin embargo su alcance se fue ampliando y su importancia es tal que se crearon cargos de responsabilidad logística en la mayoría de las empresas, evidenciando el valioso rol que juega esta en los sistemas de gestión empresarial, dice Alba⁴.

La evolución de la logística empieza en la década de los 60 cuando Peter Drucker centra la atención en la deficiencia que había en la entrega de los productos a los clientes, expandiendo así la responsabilidad de la logística a la distribución física, integrando los procesos el transporte y almacenamiento con el fin de lograr la satisfacción del cliente. De ahí en adelante su evolución se ve directamente influenciada por los cambios del entorno, modificando las circunstancias en las que se desarrollan los procesos, haciendo necesario una reforma a veces tan dramática que no solo modifica los procesos internos sino la misma filosofía de la empresa.

Hoy día es importante que la gestión logística sea flexible. Para que se considere así debe tener la capacidad de adaptarse a un entorno turbulento y tener amplio

⁴ ALBA, Osbel. Logística: conceptualización y tendencias actuales.

rango de variación, presentar bajos costos de cambios en el funcionamiento y un plazo corto para trabajar en las nuevas condiciones.

Debido al consumo en exceso de recursos naturales que se presenta generalmente en la industria, la logística ahora busca además de cumplir con las regulaciones ambientales, controlar lo que pasa con el producto una vez que el usuario lo desecha, lo cual es una de las tendencias del área, denominada logística inversa. Esta adquiere nuevas tareas, como recuperar los productos que dejan de satisfacer las necesidades del consumidor, por ende la logística ahora se encarga también del flujo de materiales y productos del consumidor al productor, buscando en este proceso aprovechar económicamente aquellos productos que dejan de ser útiles para el consumidor, mediante la reintroducción de estos a la cadena de suministro, o simplemente para su eliminación adecuada.

Las principales ventajas que brindan la logística inversa además de los beneficios económicos que pueden dar la recuperación de residuos, está obtener una información más completa por la retroalimentación del producto que dan los clientes, formando una relación de confianza y la mejora de la imagen de la empresa por su compromiso ambiental. La implementación de un proceso de logística inversa en una compañía más que desventajas tiene aspectos críticos, como dice Cure y Amaya⁵, pues se requieren estudios individuales y minuciosos que abarquen hasta el diseño de los productos y ver qué mejoras se pueden hacer en estos, que estén relacionadas principalmente con los materiales necesarios para su producción, que se puedan reutilizar, reciclar o encontrar la manera apropiada para desecharlos. Además como estas actividades son nuevas en las tareas logísticas, aún es difícil acertar con exactitud cuáles serán las entradas por parte del cliente, y controlar los costos de estas devoluciones en pequeñas

⁵ CURE, Laia, MEZA, Juan Carlos y AMAYA, René. Logística inversa: una herramienta de apoyo a la competitividad de las organizaciones. En: ingeniería y desarrollo. 2006. Julio-Diciembre. P 184-202.

cantidades. Así, lo positivo o negativo de un proceso de logística inversa depende de la forma que se gestione y la naturaleza de la empresa.

4.3 LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS

La logística urbana estudia cómo las personas, mercancías e información superan el tiempo y la distancia de forma eficiente, mediante la optimización de los servicios que ofrece una ciudad. Su tratamiento ha presentado grandes avances desde la década de los años 80, resultado de un cambio de lo que se considera necesario para la administración de una ciudad, que se empiezan a ver como unidad de negocio a la cual es necesario aplicar principios empresariales que han tenido éxito en entornos privados para hacer su gestión más adecuada, incrementando su competitividad y asegurando un desarrollo sostenible.

Con las nuevas demandas por parte de los ciudadanos, la administración pública no solo debe centrar su gestión en ofertas de trabajo y vivienda para ser atractivas, debe preocuparse por ofrecer variedad de productos y servicios de buena calidad.

La logística urbana de mercancías es el eslabón de la cadena de transporte que se sitúa dentro de la ciudad, es decir su única preocupación es una gestión adecuada de la distribución de mercancías dentro de la ciudad, sea para aprovisionar a consumidores o empresas. Como incluye a todo el tráfico que se genera debido al transporte de mercancías, debe contemplar el movimiento generado por productos que se despachan de esta hacia otras ciudades. No es posible generalizar si la mayoría del tráfico generado por la logística urbana de mercancías es causado por operaciones de aprovisionamiento o de despacho, esto es determinado por las actividades económicas que se desarrollan en cada

ciudad; aunque el tráfico de los habitantes de una ciudad también afecta sus operaciones, este problema no se tiene en cuenta porque no es de su dominio.

Su estudio ha sido importante desde 1999, cuando empezó lo que se conoció como el *Golden age* de la logística de las ciudades. Los problemas que se manejan en la distribución urbana de mercancías han evolucionado a medida que cambia el entorno en que se desarrolla, su tratamiento y entendimiento es cada vez más complejo, si se tiene en cuenta la mayor demanda de bienes en las ciudades, que aumentan las operaciones de logística urbana.

La distribución urbana de mercancías lleva consigo impactos negativos, estudios realizados por Lindholm y Behrends⁶ indican que sus actividades generan entre el 20% y 30% del tráfico de las ciudades, y representa la emisión de al menos el 50% de contaminantes en el ambiente, además de ser el mayor generador de tráfico y accidentes en las ciudades. Por lo anterior, en muchos países es más importante el buen manejo de la distribución de mercancías, que la gestión de la movilidad de las personas, sea en bicicleta, motocicleta, vehículo privado, sistema de transporte público o como viandante (persona que transita a pie por espacios públicos).

En el pasado la logística urbana de mercancías buscaba únicamente una reducción de los costos del transporte, considerando que dentro de la cadena logística, la distribución de mercancías conocida como la última milla, o *last mile*, es la etapa del proceso de transporte que por lo general presenta mayores costos, lo cual repercute en el costo final del producto. Si bien esta tarea está al final de la cadena de suministro, está relacionado con todos los agentes de la cadena logística, especialmente los transportistas. Involucra procesos complejos que se relacionan directamente con características dinámicas de la ciudad, principalmente con el tráfico y la movilidad, que presentan alto grado de incertidumbre, afectando

⁶ LINDHOLM, Maria y BEHRENDTS, Sonke. Challenges in urban freight transport planning-a review in the Baltic sea region. *En: journal of transport geography*. 2012. vol 22, p. 129-136

así la efectividad del proceso, con el cambio que podría tener en los tiempos de transporte disminuyendo el tiempo de espera del cliente. Hoy día, aunque los costos siguen siendo un factor importante, su principal objetivo es reducir el impacto de sus operaciones en la contaminación, accidentes, ruido, deterioro de la tierra y cambio climático.

Algunos productos por sus características demandan que la empresa encargada de su distribución también realicen su recolección, como el caso de ciertos productos hospitalarios que después de su uso se convierten en tóxicos y necesitan un manejo especial para su manejo, o cuando la empresa trabaja bajo un modelo de logística inversa. Este modo de operación genera actividades de entrega y recolección, en los sitios donde se lleva mercancía, después de su descarga, también se debe recolectar mercancía que ya no resulta útil para el cliente, esta actividad es clave a considerar en la logística urbana de mercancías, especialmente por problemas de utilización de la capacidad de los vehículos.

Dado que todas las ciudades tienen características diferentes se descarta la posibilidad de un modelo de logística urbana de mercancías aplicable de forma general. Sin embargo, tener claro los actores que hacen parte en la distribución de mercancías y sus interacciones, hace más fácil la adaptación, creación y mejoramiento de modelos.

4.3.1 Actores de la logística urbana de mercancías. Los actores implicados en la logística urbana de mercancías se pueden agrupar en dos según sus intereses, por un lado se encuentra la administración pública que desean reducir los impactos negativos en el bienestar social y ambiental, derivados de las actividades desarrolladas por la DUM, por otro lado está el sector privado, que busca desarrollar sus actividades logísticas a un buen precio, con alta calidad y con el menor daño ambiental posible.

La administración pública, además de su preocupación por el impacto ambiental y social, deben prever la infraestructura necesaria para garantizar la accesibilidad de

la mercancía a la ciudad, para favorecer un buen crecimiento económico; además se encarga de establecer políticas para regular la distribución de mercancías en sus vías.

Estas políticas se pueden agrupar según su función en normativas, de planeación, informativa y de señalización, tecnológica y de seguimiento.

- Acciones normativas: son las encaminadas a la generación de normas que restrinjan como se distribuye la mercancía, estas están encaminadas principalmente a gestionar la capacidad de las vías y normas de sostenibilidad.

La creación de horas valle, es decir, permitir la carga o descarga de mercancía solo a específicas horas en ciertos puntos de la ciudad, o el uso de la logística nocturna son un claro y común ejemplo de normas que buscan gestionar la capacidad de las vías. Los peajes se usan con el mismo fin, con este modelo se espera no solo que disminuya la congestión de vehículos en zonas específicas de la ciudad, sino que sus ganancias se usen para una mejora de infraestructura.

La prohibición de acceso de vehículos transportadores de mercancía a ciertas zonas hace que las empresas transportadoras hagan esfuerzos en la creación de rutas alternas o esquemas de ruteo con carros más pequeños para distribuir a los lugares que se puedan ver afectados por estas políticas.

En políticas modernas están las que hacen aprovechamiento de los avances en las tecnologías de información, enfocadas principalmente en prohibir viajes de vehículos cuya capacidad no esté siendo aprovechada, es decir vehículos vacíos, lo que obliga a las compañías

transportistas a compartir información y cooperar, de forma que siempre hagan viajes con un máximo uso de carga, cumpliendo así con la norma, reduciendo sus gastos de transporte y disminuyendo su impacto ambiental.

Las normas de sostenibilidad buscan principalmente reducir el grado de emisión de gases contaminantes y generación de ruido generado por la distribución urbana de mercancías, con vehículos modernos que tengan menores emisiones o que trabajen con nuevas fuentes de energía.

- Planeación: tiene dos tareas principales: la planeación del uso de tierras y del desarrollo de las ciudades. Es una labor crítica para la administración pública por múltiples motivos, el primero es que los problemas generados por la distribución de mercancías se atribuyen generalmente al sector privado, por esto no hay expertos en el tema ocupando cargos gubernamentales, lo que se ve reflejado en la falta de conocimiento e interés en el tema por parte del gobierno.

Otro aspecto crítico es que la planeación se ve afectada por múltiples factores externos: culturales, legales, institucionales, financieros, políticos y tecnológicos, cuya integración resulta complicada, especialmente con un problema tan complejo como es el manejo de la logística urbana.

El peor resultado de una planeación es que el crecimiento económico de la ciudad se vea limitado por falta de infraestructura, para evitar esto es necesario garantizar la accesibilidad a esta. La accesibilidad busca que la ciudad soporte el incremento del tráfico generado por el aumento en la cantidad de bienes que ofrece, meta que es difícil de cumplir teniendo

en cuenta que el tráfico siempre va a crecer a mayor ritmo que la infraestructura disponible para el transporte de mercancías.

Una apropiada planeación del uso de tierras logrará disminuir el tráfico generado por la distribución de mercancías, asignando una distribución específica al comercio, que es el eje central en el que se desarrollan las actividades de la logística urbana de mercancías, con medidas que obliguen a empresas según el producto que ofrecen a ubicarse en zonas específicas de la ciudad que tengan la infraestructura necesaria para desarrollar sus actividades, o si se puede a las afueras de la ciudad.

- Acciones informativas y de señalización: buscan comunicar la normatividad pertinente a los transportadores de mercancía urbana, la más común es una señalización clara en las vías, identificando qué calles no son apropiadas para cierto tipo de vehículos, qué zonas están habilitadas para realizar tareas de carga/descarga y horarios aptos para desarrollar estas actividades. En ciudades donde se tienen apropiadamente definidas las políticas de la logística urbana de mercancías, incluso se hacen mapas de qué calles o rutas están habilitadas para qué tipo de vehículo con restricciones de horario y peso, lo que facilita no solo el cumplimiento de la norma por parte de los transportistas, sino también el diseño de rutas que deben realizar las empresas transportadoras para entregar la mercancía de manera óptima.
- Acciones de tecnologías de información: son las que se apoyan de los avances que se han presentado en este campo y permiten aumentar la eficiencia de las empresas transportadoras, da información en tiempo real estado del tráfico en las vías, lo que con un buen manejo se vería reflejado en menos tiempo en congestión vehicular, una mejor

comunicación entre empresas competidoras, lo que con una filosofía de cooperación resulta en beneficio mutuo. Al momento de planeación de la distribución de la mercancía también aporta beneficios pues con una buena información base se pueden aplicar técnicas de simulación que brindan un resultado altamente confiable.

Incluso los clientes se ven beneficiados de estos avances tecnológicos pues pueden tener mayor información del estado de su producto, saber en qué lado viene, lo cual genera una sensación de mayor poder sobre su producto.

- Acciones de seguimiento: medidas que se toman para asegurar que se cumplan con las normativas estipuladas para la distribución urbana de mercancías, pueden ser acciones como control por parte de policía, sin embargo esta técnica produce costos altos y puede resultar ineficiente, por lo que se han desarrollado nuevas estrategias para hacer este seguimiento, como el uso de cámaras, o relojes que midan el tiempo desde que un vehículo inició su actividad de carga o descarga, y con una alarma indiquen cuando se pasó el tiempo permitido para realizar esta actividad, de forma que el reloj activa una alarma, o genera una multa, según esté diseñada la política.

En el sector privado se pueden identificar los proveedores, transportadores y clientes, cuyos objetivos no son heterogéneos, pues a todos los afecta la distribución de mercancías de manera diferente.

Para los proveedores sus objetivos principales son garantizar su crecimiento en el mercado manteniendo un alta rentabilidad; desde un ángulo de la distribución de

mercancías, Cherret⁷ identifica dos tipos de proveedores, según el bien o servicio que ofrecen, estos son: proveedores de bienes *core*, que hacen referencia a aquellos que se consideran primordiales para el desarrollo de la actividad económica del negocio, y los proveedores que visitan a los establecimiento para brindar algún tipo de servicio.

Las visitas de los proveedores *core* pueden ser a establecimientos urbanos, o un hogar de un consumidor final directamente. Según el tipo de empresa a la que se realiza la visita estos bienes pueden ser materias primas, o producto terminado listo para ser almacenado, distribuido o vendido. Su comportamiento se debe en gran parte a las siguientes características del bien transportado:

- Momento del día en que se entrega la mercancía: por lo general estos bienes *core* se entregan de día, y son los que más generan visitas a los establecimientos semanalmente. la mayoría están programados indicando el día en que se entregarán, pero no la hora exacta de entrega.
- Día de la semana en que se hace la entrega: varía notoriamente según la actividad economía de la ciudad, de forma que no hay una tendencia general de cuál es el día que más tráfico hay a causa del transporte de mercancías.
- Demanda estacionaria del producto: en algunos productos se presenta un aumento de la demanda en cierta época del año, por lo general en los meses de octubre a diciembre, comportamiento que se debe tener en cuenta para el diseño de medidas que eviten el aumento del tráfico en esta época. Cabe aclarar en este aspecto, que una adecuada gestión de la capacidad por parte de la empresa transportadora, hará que el

⁷ CHERRETT, Tom, et al. Understanding urban freight activity – key issues for freight planning. En: journal transport of geology. 2012 vol. 24. P 22-32.

aumento de la demanda en ésta época se maneje con un aumento en la ocupación de los vehículos y no en el aumento de vehículos necesarios.

- Vehículo usado: está relacionado con las especificaciones que presente el producto para su transporte adecuado y restricciones normativas.
- *Back loading*: Alguna mercancía requiere que el distribuidor se encargue de su desecho, ya sea por obligación o por que el distribuidor da la opción de encargarse de la mercancía después de ser usada, cualquiera sea la situación, esto hace la planificación de la capacidad del vehículo más compleja, pues estos van a tener mayor ocupación.
- Tiempo que dura estacionado el vehículo entre carga y descarga de mercancía: este factor, además del peso, tamaño del producto y empaque, depende también de las facilidades que se tengan para parquear cerca al lugar donde se hará la entrega, si se parquea en la calle o una bahía específica, características del vehículo, personal encargado de recibir la mercancía o ayudantes y herramientas para la descarga y los procesos de verificación que se realicen en la recepción por parte del cliente.

Los proveedores que ofrecen un servicio afectan la congestión, no por el tamaño de los vehículos, pues por lo general estas visitas se realizan en motos, vehículos o vans, sino porque no todos los establecimientos cuentan con espacios de parqueo cerca, y el hecho que se preste un servicio necesariamente implica un tiempo de parqueo considerable.

Según el tipo de la visita cambia la frecuencia de estas y tiempo de parqueo cerca al establecimiento, por ejemplo el servicio de recolección de residuos se hace con una frecuencia considerable, pero el tiempo de parqueo es mínimo, pues es una

tarea que se hace en poco tiempo, contrario al caso de visitas de mantenimiento de equipos en un establecimiento comercial, que idealmente se hace con poca frecuencia, pero cada visita toma un tiempo considerable, lo que implica tiempos de parqueo prolongados del vehículo de la persona que presta el servicio.

Los segundos actores del grupo privado son los transportadores, su principal tarea es distribuir la mercancía, evitando el tráfico y logrando la reducción de costos y contaminación en sus rutas de distribución. Estos transportadores presentan las siguientes características según su modo de operación:

- Operadores logísticos: por lo general son contratados por proveedores, su responsabilidad no se limita al transporte de la mercancía, sino también puede prestar servicios de almacenamiento. La globalización, y con esta la necesidad de las empresas de internacionalizarse ha aumentado el uso de estos agentes. Estos operadores manejan volúmenes medianos, por lo que no requieren vehículos grandes (a menos que el producto lo requiera), tienen definidos los puntos de entrega, que varían poco, y sus rutas por lo general recorren distancias largas, por lo que tienen poca frecuencia en sus entregas.
- Distribuidores: estos agentes pueden ser los dueños de la mercancía, o contratados especialmente para el transporte de esta. Si son los mismos productores está el beneficio de tener mayor control sobre su cadena de suministro, sin embargo, por costos, la tendencia es a contratar a terceros que se encarguen específicamente de la distribución de mercancías. Estos distribuidores tienen por lo general rutas definidas, donde los clientes son semanalmente los mismos, por lo que no hay cambio en las rutas que manejan. La frecuencia de sus recorridos y tamaño de carga está relacionado con las características del producto a transportar, sin embargo se asocian grandes volúmenes de transporte a sus actividades.

- Auto aprovisionamiento: Esquema usado generalmente por negocios pequeños, que tienen vehículos propios para realizar el transporte de mercancía comprado a mayoristas, usualmente hacen recorridos diarios con rutas definidas. Los vehículos usados son pequeños, lo que hace que se pueda transportar pequeñas cantidades de mercancía y aumente la cantidad de viajes en las vías urbanas, afectando así la congestión de la ciudad.

Sin importar el modelo de operación del transportista, al momento de la planeación para la distribución de la mercancía, el volumen o la cantidad a transportar no es un factor crítico, como sí lo es la cantidad de viajes que se tenga que hacer dentro de la ciudad para satisfacer una demanda. Desde este punto de vista, un minorista que se auto aprovisiona de mercancía con un vehículo pequeño, generaría más congestión en el centro urbano, que un vehículo de gran tamaño, con más mercancía, que hace menos viajes diariamente para satisfacer las necesidades de su cliente.

El último actor de la logística urbana de mercancías es el cliente, estos son los que generan la demanda de bienes, se podrían categorizar según sus necesidades de la siguiente manera:

- Establecimientos comerciales: entre mayor sea su tamaño, se espera que tengan una planeación de recepción de mercancía más organizado. La frecuencia de las visitas que necesitan semanalmente varía según el tipo de producto que ofrezcan, por ejemplo: los supermercados van a recibir múltiples visitas diarias debido a la variedad de productos de ofrecen y los diferentes proveedores que necesiten para satisfacer esta necesidad. Dentro de esta variedad de productos, algunos como los alimentos demandan una mayor visita de distribuidores a la semana, pues se hace imposible mantener los alimentos frescos por largos

periodos de tiempo, caso diferente al de productos de higiene, que se pueden pedir en grandes cantidades y mantener almacenado por largos periodos de tiempo, lo que disminuye la frecuencia de visitas por parte de los distribuidores a estos establecimientos.

Desde este punto de vista lo mejor para la congestión en el área urbana generado por el transporte de mercancías, sería trabajar siempre con pedidos grandes de mercancía para disminuir las visitas a los diferentes establecimientos comerciales, sin embargo, se debe tener en cuenta que estos están ubicados dentro de la ciudad, especialmente en áreas comerciales, donde el precio del suelo es cada vez más costoso, lo que no hace fácil que todos los establecimientos tengan superficies grandes destinadas solamente al almacenamiento de mercancía.

Esta situación hace que ciertos negocios generen nuevas estrategias que eviten las visitas constantes de distribuidores aunque no se tenga el suficiente espacio para almacenar, por ejemplo los negocios de muebles, por lo general cuentan con locales en el área comercial de la ciudad donde solo se muestran productos de exhibición, y tienen bodegas fuera de la zona comercial donde se almacenan los productos, de donde son llevados directamente al domicilio del cliente.

- Distribución comercial tradicional: Esta categoría reúne a los establecimientos más pequeños de carácter familiar, usualmente estos clientes tienen un modelo de auto aprovisionamiento, por lo que se considera que son los que más generan recorridos en una ciudad, aunque lo hagan en vehículos pequeños o vans.
- Empresas de servicios: tienen relación con la distribución urbana de mercancías, pero se considera que su impacto en la congestión

generada es poco, porque la mayoría de visitas que reciben a la semana son domicilios de documentos o cajas pequeñas por parte de motorizados o vehículos pequeños.

- Establecimientos industriales: por la labor que se realiza en estos y los altos precios del suelo en áreas urbanas, estos optan por ubicarse a las afueras de las ciudades, por esto los vehículos que le distribuyen mercancía no entran a las ciudades, lo que hace que su demanda de productos pierda relevancia en la logística urbana de mercancías.
- Domicilios: La globalización y el comercio electrónico ha hecho que el uso de este modelo aumente, el mayor impacto que tiene en la distribución urbana de mercancías es que los vehículos deben llegar hasta las casas de los clientes, lo que dificulta la programación de rutas, y se pueden generar complicaciones al momento de la descarga de mercancía, pues no en todos los lugares hay espacios para que los vehículos paren a entregarla, especialmente si la mercancía a entregar o el vehículo en que se transportan son de gran tamaño.

4.3.2 Objetivos de la logística urbana de mercancías. De un análisis macro de la logística urbana de mercancías, se tienen 3 objetivos principales: social, ambiental y económico.

El objetivo ambiental busca la reducción de cualquier perjuicio al medio ambiente, según Demir, Bektas y Laporte⁸ estos son principalmente generados por la emisión de gases contaminantes típica de los vehículos transportadores, como

⁸ DEMIR, Emrah; BEKTAS, Tolga y LAPORTE Gilbert. A review of recent research on Green road freight transportation. En: European journal of operational research. Enero, 2014. no 237, p. 775-793.

son el N₂O y CO₂, cuya producción es proporcional al combustible consumido por el vehículo.

El objetivo social se podría confundir con el ambiental, sin embargo su foco es más general y busca mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, disminuir el riesgo de accidentes y garantizar su salud. Los principales beneficiados en el cumplimiento de los primeros dos objetivos son los ciudadanos y la administración pública.

El objetivo económico busca principalmente garantizar la prosperidad de la ciudad, con una oferta de empleos y ofreciendo productos que les permita ser competitivos. Para cumplir esto se debe mantener la rentabilidad de los productos, con costos de producción más bajos, y la reducción de costos logísticos, que se podría lograr con un mejor manejo del tráfico.

Inglada y Teixido⁹ resaltan que el cumplimiento de cualquiera de estos tres objetivos tendrá un impacto positivo en los otros 2, por ejemplo un uso eficiente del transporte de mercancías disminuirá de cierta manera la congestión en la ciudad, lo que afectará positivamente los índices de emisión de gases contaminantes, favoreciendo de manera conjunta a los 3 implicados en la distribución urbana de mercancías.

Desde un punto de vista micro de la logística urbana, cada actor tiene su propio objetivo, algunos objetivos pueden ser compartidos y otros se contradicen, pues todos los actores tienen intereses diferentes, una situación que podría demostrar esto es la siguiente: los ciudadanos son los que demandan la mayoría de bienes que mueve la DUM, sin embargo en su cotidianidad, cuando ven el tráfico en su ciudad no creen que esto sea un problema causado por ellos, lo ven como un

⁹ INGLADA, Luis y TEIXIDÓ, Narcís. Ciudad y mercancías: logística urbana. Políticas de movilidad y soluciones de gestión de la logística urbana para las empresas y los organismos públicos. 2 ed. México: Alfaomega, 2013. 160 p.

problema de los transportadores, pues el único interés del ciudadano es obtener el bien.

Los objetivos relacionados con la logística urbana de mercancías de cada actor según Anand et al¹⁰ se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Objetivos según actores de la logística urbana.

ACTOR	OBJETIVO
Residentes	Tener acceso a variedad de productos y servicios Reducción del impacto ambiental, para lograr una mejor calidad de vida
Autoridades	Garantizar accesibilidad Creación de políticas y regulaciones Reducción del impacto ambiental
Proveedores	Crecimiento del mercado Rentabilidad
Transportadores	Reducción del tráfico Reducción de costos
Cliente	Competitividad Rentabilidad

Fuente: GenCLON: an ontology for city logistics. Modificada por el autor.

Se puede agregar a la lista de objetivos de los transportadores la reducción de emisión de gases contaminantes. Taniguchi y Thompson¹¹ nombran este objetivo como el principal, la reducción de emisión de CO₂ va directamente relacionada con el consumo de combustible, lo que tiene una fuerte correlación con los gastos de transporte, porque afirma que al planear una ruta de distribución, para lograr

¹⁰ ANAND, Nilesh, *et al.* GenCLON: an ontology for city logistics. *En*: Expert systems with applications. 2012. vol 39, p. 11944-11960.

¹¹ TANIGUCHI, Eiichi y THOMPSON, Russell. Modeling city logistics. *En*: Transportation research record. Enero, 2007. vol 1790, p. 45-51.

costos más bajos el objetivo a minimizar no es la distancia, sino el consumo de combustible.

Para el cumplimiento de estos objetivos todos los actores deben realizar actividades con la ayuda de múltiples recursos, los más usados en la distribución de mercancías son los siguientes.

4.3.3 Recursos de la logística urbana de mercancías Se pueden identificar dos tipos de recursos: recursos monetarios y no monetarios. Los recursos monetarios pueden venir de fondos públicos y privados, y son usados en gran variedad de inversiones que mejoren las actividades de la distribución de mercancías.

Los recursos no monetarios son: el combustible usado para transportar la mercancía, los bienes transportados, el personal que toma parte en las operaciones de transporte, desde que se recoge hasta su entrega, software, equipos que se usan para la carga, descarga, entrega, recibimiento o manejo de mercancía, infraestructura y bases.

La infraestructura es un recurso que va a beneficiar al sector privado, sin embargo Gonzales y Routhier¹² atribuye la responsabilidad de su gestión a la administración pública. La infraestructura de la logística urbana de mercancías se refiere especialmente a la disponibilidad de zonas de carga y descarga (diseñadas de tal forma que no intervengan en el espacio público), aceras, semáforos, redes de suministro y las vías de acceso que estén permitidas para que transite la mercancía, todo esto mejorará la circulación de la mercancía dentro de la ciudad y las operaciones de carga o descarga en establecimientos.

¹² GONZALES- FELIU, Jesus y ROUTHIER, Jean-Louis. Modeling urban goods movement: How to be oriented with so many approaches?. En: Procedia social and behavioral sciences. 2012, vol. 39. P 89-100.

Un ejemplo de infraestructura moderna en la distribución urbana de mercancías es el siguiente: cuando se debe entregar un producto directamente a la casa del cliente, es difícil para la empresa transportadora garantizar que el usuario esté en su hogar al momento de la entrega, lo que hace que la empresa pierda su viaje, y genere más recorridos de los debidos, para disminuir este tráfico innecesario, en Alemania, se crearon unas cabinas distribuidas estratégicamente, en las que se deja la mercancía, de manera que el cliente la recoja, sin tener que hacer un largo recorrido desde su casa, lo cual eliminó viajes innecesarios a las empresas transportadoras, reduciendo así la congestión generada por la DUM.

Las bases hacen referencia a los lugares donde se deben entregar o recoger la mercancía, como centros logísticos, bodegas, sectores comerciales o residenciales. El acceso a algunos de estos recursos va a hacer más fáciles las actividades a desarrollar en la distribución de mercancía. Por ejemplo, al momento de recoger la mercancía, este proceso se ejecuta mejor en un centro logístico, donde se espera que se tenga la infraestructura necesaria para su carga o descarga, situación que no se va a presentar en un hogar o local comercial.

4.3.4 Actividades de la logística urbana de mercancías Las actividades desarrolladas en la distribución urbana de mercancías son típicas de la logística y requieren al menos de 1 actor, que hace uso de mínimo un recurso. Las actividades que se deben llevar a cabo en un proceso de distribución depende de cada situación particular, y pueden ser las siguientes: ordenar, recibir, descargar, almacenar, cargar, verificar, transportar mercancía, y consolidación entre actores.

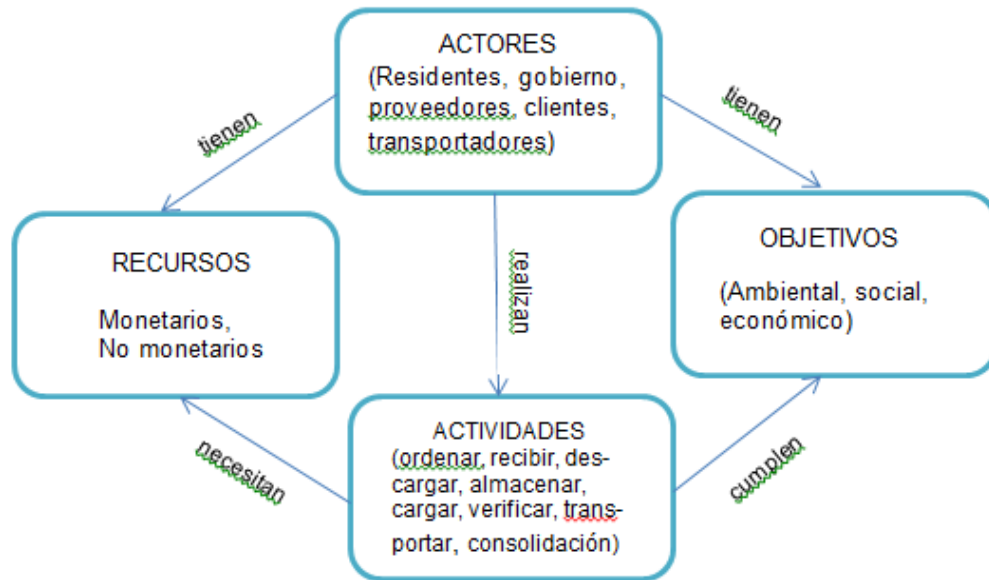
De todas estas la actividad de transporte es la más importante, pues es la única que siempre se va a llevar a cabo en la DUM, se presenta de múltiples maneras, de proveedor a proveedor, de proveedor a retailer, de proveedor a cliente o retailer a cliente. Esta actividad requiere especial atención cuando va dirigida al cliente

final, pues es la que más congestión genera, representa costos altos y es difícil de manejar.

Dado que todas las ciudades tienen características diferentes no es posible generalizar un modelo de optimización de logística urbana de mercancías, sin embargo tener claras las interacciones entre los actores, sus objetivos, recursos disponibles y actividades a desarrollar, proporciona la base para entender el problema de la distribución de mercancías, lo que resulta necesario para la creación, aplicación o adaptación de modelos de optimización.

La figura 1 resume los agentes y relaciones que se identificaron en la logística urbana de mercancías:

Figura 1. Agentes y relaciones en la logística urbana de mercancías.



4.3.5 Problemas de la logística urbana de mercancías El problema de predicción de la demanda de logística urbana es uno de los más críticos de la distribución de mercancías, pues esta indica si la creación de infraestructura o políticas es necesaria en las ciudades. A pesar de su importancia, según Gentile y

Vigo¹³ hay pocos modelos que manejan el tema, pues la mayoría de información que se encuentra son descripciones de la distribución de mercancía en diferentes tipos de ciudades, que tras múltiples estudios logran determinar el promedio de viajes para ciertas zonas de una ciudad.

Otro problema es la decisión de inversión en infraestructura, esta juega un papel importante en las ciudades, pues son facilidades para el desarrollo económico, seguridad vial y control de la densidad del tráfico. Yamada et al¹⁴ identifica la longevidad del proyecto como el objetivo más importante a tener en cuenta, pues esto determina el uso de la vía sin ser modificada y sin mantenimiento, otros objetivos son la protección del medio ambiente (tiene en cuenta la destrucción de flora, fauna, paisaje, tierra, consumo de recursos naturales y emisión de CO₂), duración de construcción (siempre se busca que sea menor, lo cual representa mayor costo de mano de obra, pero menor riesgo de accidentes e inconvenientes para los residentes del sector) y viabilidad económica (hace una relación entre los precios de construcción y el flujo de vehículos que se espera que vaya a pasar).

La decisión de invertir en proyectos de infraestructura se puede evaluar calculando el beneficio que presente, con un análisis de sus costos y retorno. Aunque ya hay múltiples métodos y modelos para evaluar estos problemas, según Meiduté¹⁵ pocos se han diseñado para tratar específicamente el problema en proyectos de inversión para infraestructura de la logística urbana de mercancías. Los existentes sirven como una guía de referencia útil para la evaluación de inversión en infraestructura.

¹³ GENTILE, Guido y VIGO, Daniele. Movement generation and trip distribution for freight demand modelling applied to city logistic. En: European transport. 2013. vol 54, no 6, p. 52-79.

¹⁴ YAMADA, Tadashi, *et al.* Designing Multimodal Freight Transport Networks: A heuristic Approach and Applications. En: Transportation science. Mayo, 2009. vol 43, no 2, p. 129-143.

¹⁵ MEIDUTÉ, Leva. Economical evaluation of logistics centres establishment. En: Transport. Febrero, 2007. vol 22, no 2, p. 111-117.

La localización de facilidades logísticas es otro problema que le concierne a la logística urbana, pues esta define la forma y estructura de la cadena logística en la que se van a desarrollar las actividades de transporte urbano. Alumur y Kara¹⁶ dice que la localización es su aspecto más estudiado, porque de esta depende que se logre una reducción del impacto en el medio ambiente, residentes, costos de distribución y mayor cobertura de la demanda.

Encontrar la ubicación óptima resulta complejo por las limitaciones que se pueden presentar por regulaciones gubernamentales que estipulan la normatividad asociada al uso de suelo, además al momento de la toma de decisión muchos parámetros a tener en cuenta tienen alto grado de incertidumbre, lo que hace un reto hallar una localización óptima. Por lo general estos centros quedan localizados en los perímetros de las ciudades, por el fácil acceso de vehículos pesados, costos rentables de suelo y evitar altos costos de transporte, pues un terreno lejos de la ciudad puede ser económico, pero trae incrementos considerables en los kilómetros recorridos en los viajes a la ciudad.

Un centro de distribución, representa ahorros en los costos de transporte de la mercancía, mejor uso del factor de carga y una disminución del tráfico en las ciudades generado por la distribución urbana de mercancías, debido a la baja de vehículos requeridos para esta. A pesar de estos beneficios, muchas empresas prefieren no hacer uso de estos centros logísticos, porque pierden el control de toda su cadena logística; también hay que tener en cuenta características del producto, por ejemplo si se manejan productos perecederos, el tiempo es más importante que el costo, por lo que no sería ventajoso trabajar con un centro logístico, donde la mercancía deba esperar un tiempo adicional para ser entregada.

¹⁶ ALUMUR, Sibel y KARA, Bahar. Network hub location problema: the state of the art. En: European journal of operational research. 2008. Vol 190, p. 1-21.

El problema más estudiado en la DUM es la programación de vehículos, esta se encarga de planificar los días, horas de salida y de llegada, carga y rutas de la distribución de mercancías. Según el tipo de negocio algunos modelos son considerados tácticos, pues las rutas se planean por periodos de tiempo prolongados, porque los clientes y demandas que manejan son estables por esos periodos de tiempo. Por otro lado hay rutas de distribución que se deben programar todos los días, porque los clientes y las demandas de estos varían constantemente, por lo que se considera un problema de nivel operacional.

Inicialmente la programación de vehículos se hacía con el fin de disminuir tiempos o distancias recorridas y costos, con el tiempo se fueron agregando consideraciones para disminuir la cantidad de vehículos usados, mejorar la gestión de la capacidad y las rutas de los vehículos después de entregar la mercancía, es decir, el viaje de vuelta a las bodegas de distribución (*backhaul*) y reducir el impacto ambiental.

La DUM se ve afectada por variables que no se pueden predecir con exactitud al momento de su planeación, sin embargo es posible asignar a estas variables una distribución probabilística, para tener un planteamiento del problema más real. A pesar de agregar una distribución probabilística a ciertas variables, es imposible conocer con exactitud cómo se van a presentar situaciones del tráfico o de la demanda, que tienen un alto nivel de incidencia en la DUM, por lo que se agrega al problema un factor dinámico. Avances en las tecnologías de información han resultado valiosos para tratar el problema de ruteo de manera dinámica dando lugar a modelos que tienen en cuenta las variaciones en tiempo real que se pueden presentar durante la distribución de mercancías.

4.4 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

Los modelos de optimización sirven como herramienta para la toma de decisión que maximizan o minimizan una función objetivo a partir de un método o técnica de optimización, sometidas a un conjunto de variables y restricciones. Su aplicación abarca la micro/macro economía, finanzas, marketing, economía de la energía, asignación de tareas, organización de la planificación de operaciones, ingeniería química etc. Para dar una adecuada comprensión a estos modelos es necesario tratar 3 conceptos con los cuales están estrechamente relacionado: investigación de operaciones, modelos y optimización matemática.

4.4.1 Investigación de operaciones Esta ciencia al igual que la logística tiene su origen durante la segunda guerra mundial, cuando gracias a la unión de físicos, matemáticos, ingenieros y biólogos lograron distribuir de manera eficaz la asignación de recursos escasos para las operaciones militares, a partir de su éxito en esa aplicación, el uso de su técnica se expandió hasta las empresas.

La investigación de operaciones según Robinson¹⁷ es una ciencia cuya finalidad es mediante la aplicación de métodos científicos repartir recursos de manera eficiente para lograr la satisfacción óptima de un objetivo específico deseado. Su objetivo principal es establecer políticas y acciones de forma científica, para esto se debe construir un modelo matemático del sistema, que prevea y compare posibles resultados de diferentes estrategias que se puedan adoptar para la solución de un problema, teniendo en cuenta factores de azar y riesgo que impliquen cada decisión posible.

¹⁷ Robinson, R. Welcome to OR Territory. En: OR/MS Today. Agosto, 1999. p 40-43.

La decisión a tomar en la investigación de operaciones tiene trascendencia según la magnitud del problema, puede ser individual o colectiva. La matemática se usa como ayuda para hacer una representación adecuada de una situación de tal manera que tras un modelado brinde soluciones válidas. Para la selección de la mejor solución es clave una interpretación adecuada de la información.

Las aplicaciones de la investigación de operaciones son muy amplias, abarca problemas de diseño y mejora de operaciones, conocimiento y ayuda en toma de decisiones, gestión, planificación, matemáticas, ingeniería, administración de empresas, biología, etc.

4.4.2 Modelo Matemático Es una representación matemática que da una realidad compleja expresada de forma sencilla, se usa como herramienta para la toma de decisiones, cuyos resultados sean útiles y tangibles. Basado en un problema específico organiza, estructura y analiza datos que den una solución con el uso o desarrollo de algoritmos.

Taha¹⁸ señala los siguientes 5 pasos para el desarrollo de un modelo:

- Identificación del problema: etapa que debe definir el alcance del problema con la recolección y análisis de información necesaria. Debe dejar claro cuáles son las alternativas de decisión, y las limitaciones del sistema. Debido a la dificultad de formular un modelo realista con todos los datos necesarios, esta etapa es considerada el “cuello de botella” al momento de desarrollar un modelo.
- Construcción del modelo: traduce el problema planteado en relaciones matemáticas precisas, si este se ajusta a modelos normales se puede desarrollar con algoritmos ya existentes. Si el modelo es muy complejo

¹⁸ TAHA, Hamdy. Investigación de operaciones. 7 ed. México: Pearson Education, 2004. p 8,9.

se puede simplificar el modelo y usar métodos heurísticos o simulaciones que den resultados aproximados. En algunos casos se puede y es necesario usar una combinación de modelos matemáticos, de simulación y heurísticos para resolver el problema.

- Solución: halla solución numérica óptima al problema planteado mediante el uso de algoritmos de optimización. Como al plantear el modelo en muchas ocasiones los parámetros no se pueden estimar con exactitud, es recomendable realizar análisis de sensibilidad que brinde información adicional sobre el comportamiento de la solución óptima cuando los parámetros del modelo sufren algún cambio. (Ramos¹⁹ muestra el análisis de sensibilidad como otro paso aparte en el desarrollo de modelos, destacando así la importancia que tiene este análisis en la solución de modelos).
- Verificación, validación y refinamiento del modelo: verifica que los resultados del modelo sean coherentes con la realidad y modifica el modelo para llevarlo a su expresión más simplificada posible.
- Implantación: lleva la solución del modelo a instrucciones de operación, de tal forma que la difusión la decisión se lleve de forma clara, precisa y completa a los implicados en su uso. Es clave también hacer una formación a los usuarios del modelo, pues la mayor parte del ciclo de vida de un modelo está dado por el uso y mantenimiento de este.

4.4.3 Optimización Es una disciplina relevante de la investigación de operaciones, su objetivo es seleccionar la mejor alternativa de solución a un problema. Ha presentado un progreso rápido, los primeros modelos de

¹⁹ RAMOS, Andres. Et al. Modelos matemáticos de optimización. Universidad pontificia comillas de Madrid, 2011. p 12-14.

optimización desarrollados a finales de la década de los 50 y que aún tienen interés son de programación lineal. En las últimas décadas se han presentado mejoras que permiten desarrollar diferentes tipos de problemas de optimización en segundos que habrían tardado decenas de años en ser resueltos. Según Nemhauser²⁰, experto en el tema de programación lineal entera, actualmente se pueden desarrollar problemas de 500.000 ecuaciones con 500.000 variables en un computador con suficiente memoria principal (aproximadamente 1MB de memoria por cada 1000 ecuaciones).

Hay 3 componentes clave que se deben definir en un problema de optimización:

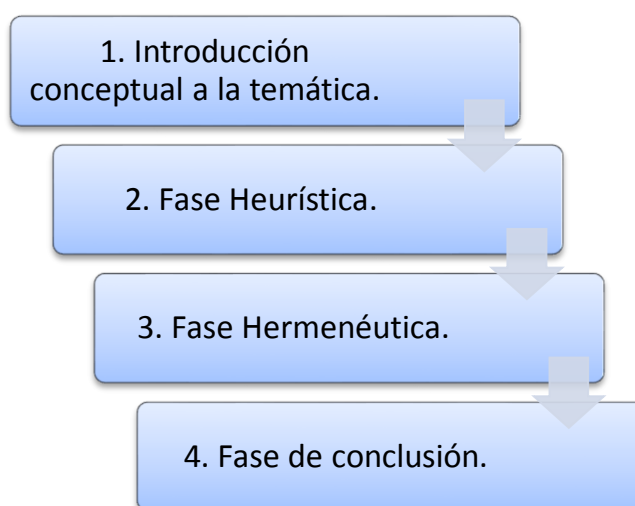
- **Función objetivo:** Es la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar.
- **Variables:** Decisiones que se pueden tomar que afectan el valor de la función objetivo. Estas pueden ser continuas (no tiene tamaño unitario mínimo) o discontinua (tiene tamaño unitario mínimo).
- **Restricciones:** Son ecuaciones que establecen relaciones que ciertas variables están obligadas a satisfacer.

²⁰ NEMHAUSER, George L. The age of optimization: solving large-scale real world problems. En: operations research. Enero, 1994. Vol.42, no .1 , p 5-13.

5. DESARROLLO METODOLÓGICO

La metodología seleccionada para el desarrollo del presente estado del arte sugerida por Galeano y Vélez²¹, tiene los pasos mostrados en la figura 2 para su adecuada creación:

Figura 2. Metodología para el estado del arte.



5.1 INTRODUCCIÓN CONCEPTUAL DE LA TEMÁTICA

El desarrollo de esta fase se ve evidenciado en el capítulo anterior, donde se explican claramente conceptos básicos como: qué es un estado del arte, logística urbana y modelos de optimización, que es necesario que queden claros para que

²¹ GALEANO M., María E. y VÉLEZ R., Olga L. (2002): Estado del arte sobre fuentes documentales en investigación cualitativa, Medellín, Ed. Universidad de Antioquia

la posterior búsqueda de información esté bien enfocada y se encuentre el conocimiento pertinente para la construcción del estado del arte.

5.2 FASE HEURISTICA

Para el desarrollo de la fase heurística se usó la ecuación de búsqueda mostrada en la imagen 1, formulada según las palabras claves que se identificaron en la revisión bibliométrica del plan de proyecto de grado.

Imagen 1. Ecuación de búsqueda fase heurística.

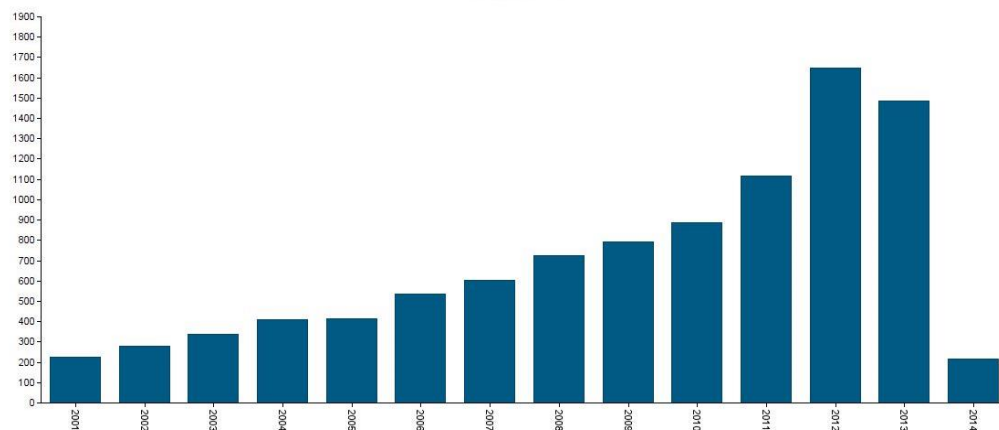
```
TS=((LOGISTIC* OR OPTIMIZAT*) AND TS=((MODEL*) AND  
(TRANSPORT OR FREIGHT DISTRIBUTION OR VEHICLE ROUTE)  
AND (URBAN PLANNING OR CITY SIMULATION OR GIS OR AIR  
POLLUTION OR GEOGRAPICH INFORMATION SYSTEM OR LAND  
USE OR RURAL OR CLIMATE CHANGE OR URBAN AREA OR
```

La búsqueda se realizó en las bases de datos de la *ISI WEB OF KNOWLEDGE*, *ELSEVIER*, *PROQUEST*, *SCOPUS* y *SPRINGER*. Se usaron estas bases de datos pues entre estas se tiene acceso a múltiples revistas especializadas en el tema de la logística como la *journal of operations management*, *journal of operation research society*, *transport research*, *international journal of physical distribution and logistic management*, *transportation science*, entre otros.

La búsqueda arrojó 758 artículos en la *ISI WEB OF KNOWLEDGE* los cuales se usaron para el análisis de la información con el software para minería de texto *VANTAGE POINT*, los resultados fueron los siguientes:

5.2.1 Registro anual de publicaciones La gráfica 1 permite ver el aumento constante de artículos que se ha dado a partir del año 2001, corroborando lo actual e importante que es el problema de la logística urbana de mercancías. El 2014 tiene un bajo número de publicaciones pues la búsqueda se realizó antes del final del primer semestre del año.

Gráfica 1. Publicaciones por año.



5.2.2 Tendencias de la logística urbana de mercancías El análisis de las palabras claves y áreas de estudio permiten tener un acercamiento al manejo actual que se está dando a los modelos de optimización de la logística urbana.

La tabla 2 muestra las 10 palabras claves más referenciadas en la búsqueda realizada, de esta se infiere que el problema del transporte es el más tratado en la distribución de mercancías, especialmente el problema de asignación de rutas de vehículos, integrando herramientas de GIS para trabajar el problema de ruteo en tiempo real. Dado que la logística urbana tiene un impacto económico, social y ambiental, es necesario que los modelos para su mejora manejen un criterio multi-objetivo, interés que se evidencia en la palabra clave “optimización multiobjetivo”.

Tabla 2. Ranking palabras claves

PALABRA CLAVE	NÚMERO DE PUBLICACIONES
Optimización	67
Transporte	36
Logística	27
Sostenibilidad	21
Simulación	20
GIS	16
Ruteo de vehículos	13
<i>City logistics</i>	12
Algoritmo genético	12
Optimización multiobjetivo	12

La palabra sostenibilidad corrobora la preocupación existente porque el transporte de mercancías en las ciudades reduzca su impacto ambiental, especialmente la disminución de ruido y emisión de CO₂. La simulación es una herramienta ampliamente usada en modelos de optimización de la logística para prever como una decisión afecta un escenario, en el caso de la logística urbana la mayoría enfocados a medir el cambio que se va a presentar en el flujo del tráfico en la ciudad. La aparición de la palabra “algoritmo genético” se explica, pues este es un método meta heurístico ampliamente usado para la solución de estos modelos de optimización.

La aduna (ver anexo 1) muestra la alta relación que tienen los modelos de optimización de la logística urbana con problemas de transporte, ruteo de vehículos, simulación, GIS y planificación urbana.

Las áreas de investigación mostradas en la tabla 3 corroboran el interés que tiene actualmente la logística urbana en la solución de problemas económicos, ambientales y sociales, trabajando principalmente con regulaciones y mejoras en la actividad de transporte.

Tabla 3. Ranking áreas de investigación.

ÁREA DE INVESTIGACIÓN	NÚMERO DE PUBLICACIONES
Ciencia ambiental y ecología	230
Ingeniería	207
Salud pública y ambiental	191
Transporte	185
Negocios y economía	95

5.2.3 Países líderes en publicaciones La tabla 4 muestra el ranking de países líderes de la búsqueda. Eventos como la conferencia de sistemas inteligentes de transporte (*International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*), conferencia mundial de investigación de transporte (*World Conference on Transport Research Society*) y la exhibición internacional de logística, movilidad y transporte inteligente, todos realizados en china, son una muestra de la cantidad de conocimiento que se genera en este país, que ayuda al manejo de la logística urbana. Muchos artículos muestran modelos aplicados a ciudades en USA e Italia, y su desempeño en estas.

Tabla 4. Ranking países líderes

PAÍS	NÚMERO DE PUBLICACIONES
USA	451
China	341
UK	237

Canadá	189
Italia	164

Del listado de países líderes también se observa la falta de tratamiento que se da al problema en países latinoamericanos, pues solo aparecen Brasil y Chile en los puestos 22 y 23, respectivamente.

5.2.4 Autores y revistas líderes en publicaciones Un mayor número de publicaciones siempre indica que una revista o *journal* cuenta con cierto prestigio en el área del conocimiento en el que se especializa. En la tabla 5 se presenta el ranking de publicaciones obtenido para el universo de artículos seleccionado.

Tabla 5. Ranking de publicaciones

Publicaciones	Revista
304	Atmosferic. Environment.
141	Transportation Research
124	Landscape Urban Planning
122	BMC Public Health
97	Journal of Geophysical Research
71	Science of the Total Environment
69	Environmental. Science. Technology.

La tabla 5 muestra a Atmosferic Environment, la revista con más publicaciones identificadas, es una revista cuyo fuerte es el estudio de las disciplinas relacionadas con la contaminación del aire y sus impactos sociales, lo cual destaca la importancia que tiene una buena planeación en la distribución urbana de mercancías actualmente en materia ambiental, cuyo cuidado se considera uno de sus principales objetivos.

En la tabla 6 se presentan los principales autores encontrados en los artículos estudiados.

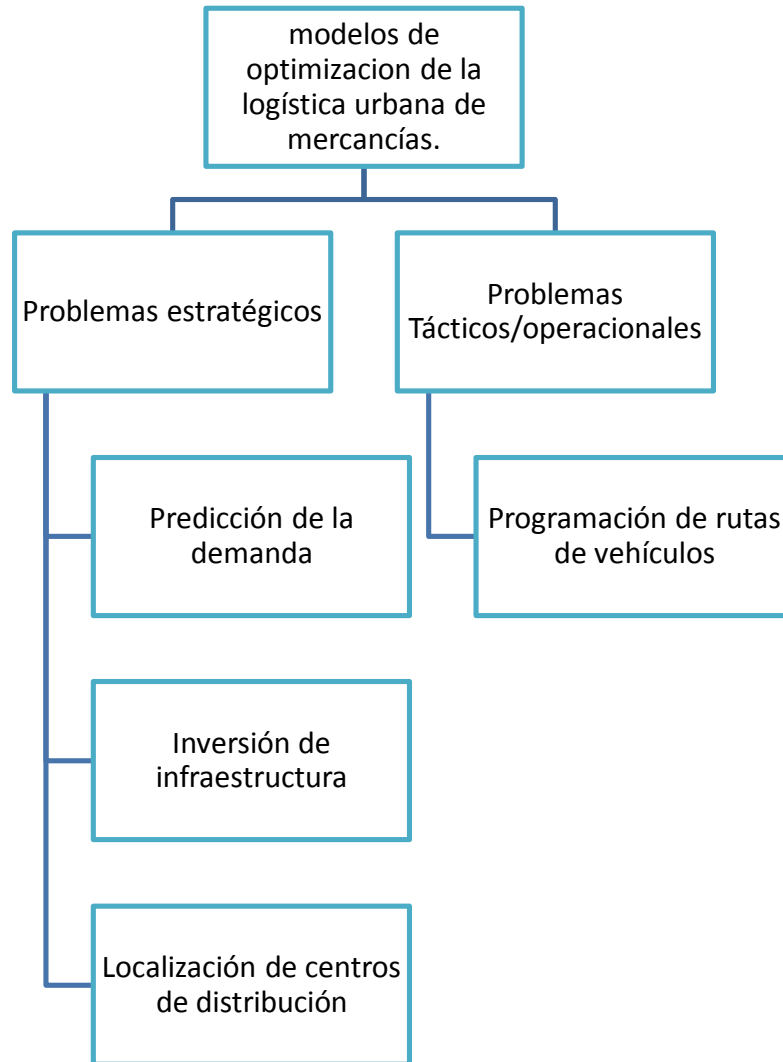
Tabla 6. Ranking autores

Publicaciones	Autores
45	Miguel Andres Figliozi
32	Roberto Tadei
30	Jesus Gonzalez-Feliu
30	Guido Perboli
23	Jesus Munuzuri

El autor más publicado, Figliozi, es conocido por su investigación en temas relacionados con vehículos eléctricos y nuevas tecnologías, modelos de reducción del emisión de gases en el aire, modelos con vehículos no motorizados para la distribución urbana de mercancías, lo cual demuestra una vez más la importancia actual de un manejo adecuado de la logística urbana de mercancía, de tal forma que disminuya la emisión de gases contaminantes.

5.2.5 Clasificación de la información La búsqueda total obtuvo 958 resultados, de los cuales tras un análisis superficial se redujo a 95 artículos, que se clasificaron de la forma presentada en la figura 3 para el desarrollo del estado del arte:

Figura 3. Clasificación información recolectada.



5.3 FASE HERMENÉUTICA

A partir de la clasificación previamente mencionada, se debe interpretar e integrar el contenido de los textos para reunir información pertinente que organice de

manera adecuada el contenido de la información recolectada. Esta fase se ve reflejada en el capítulo del estado del arte.

5.4 FASE DE CONCLUSIÓN

A partir de la creación del estado del arte se debe generar un análisis de tendencias y conclusiones en el área de modelos de optimización de la logística urbana de mercancías, para el desarrollo de investigaciones futuras.

5.5 ELABORACIÓN DEL ARTÍCULO DE CARÁCTER PUBLICABLE

La elaboración del artículo enmarcará los principales resultados del trabajo de investigación de manera clara y objetiva, con el fin de alcanzar los objetivos del proyecto.

6. ESTADO DEL ARTE

Basado en la información encontrada para el desarrollo del presente estado del arte, se clasificaron los modelos de optimización, según su objetivo, en modelos que buscan soluciones a nivel estratégico y a nivel operacional. Los modelos estudiados fueron los siguientes:

6.1 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE LA LOGÍSTICA URBANA A NIVEL ESTRATÉGICO

Los modelos para soluciones a nivel estratégico de la logística urbana, tratan de forma general el problema de toma de decisiones para la creación de infraestructura que mejore la distribución de la mercancía dentro de las ciudades. Esta decisión se considera estratégica por los altos costos que requiere su desarrollo, su tiempo de ejecución, y porque se espera que su funcionamiento sea por un periodo de tiempo prolongado. Los artículos analizados abordan problemas de inversión, predicción de la demanda y localización de centros logísticos.

6.1.1 Modelos de predicción de la demanda en la logística urbana de mercancías Holguín-Veras y Thorson²² aclara que para que un modelo de predicción de demanda de la logística urbana sea útil, no puede estar basado en la medición de la cantidad de mercancía a distribuir, sino en la cantidad de viajes que esta genera, por lo que los modelos de predicción basados en los productos (*commodity based models*) no se ajustan a las características de la demanda de la distribución de mercancías.

²² HOLGUIN-VERAS, Jose y THORSON, Ellen. Trip Length Distributions in Commodity-Based and Trip-Based Freight Demand Modeling: Investigation of Relationships. En: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Enero, 2007. no 00-0910, p. 37-48.

Nuzzolo, Crisalli y Comi²³ proponen un método gravitacional para la predicción de demanda de la DUM, El modelo se basa en una teoría gravitacional, donde se identifican los principales puntos donde se recolecta la mercancía (que por lo general están centrados), estos puntos donde hay un movimiento logístico importante se denominan portales y a cada uno es asignado un peso según la cantidad de mercancía y vehículos que manejen. Luego se identifican los puntos generadores de transporte de mercancías, los cuales son considerados centroides. Con los portales y centroides se organiza una matriz de atracción, donde se relaciona cada punto de origen con su destino, asignando un vector que contiene información de distancia y costos de transporte para cada recorrido. El modelo también tiene en cuenta la de cantidad de empleados en la zona, lo que permite acercarse más a una magnitud verdadera de la demanda de mercancía.

Gentile y Vigo²⁴ proponen dos modelos para estimar el número de viajes producidos por cada ciudad por movimiento de mercancía. El primero es un modelo lineal indexado, se considera indexado porque trabaja con información de promedios y se aplica a una estructura de clasificación. Para calcular los viajes el modelo diseña un “árbol” para cada ciudad, que recopila la información de su comercio, siendo los nodos los sectores comerciales que se desempeñan en la ciudad y las ramas los subsectores de estos. Basados en información de los viajes que genera cada sector, a cada nodo se asigna una cantidad de viajes y estos se distribuyen en sus subsectores, la información es calibrada con el algoritmo mínimo cuadrado no negativo de lawson. La suma de los nodos con sus respectivas ramas determinará el total de viajes en la ciudad.

²³ NUZZOLO, Agostino;, CRISALLI, Umberto y COMI, Antonio. A delivery approach modeling for urban freight restocking. En: Journal of civil engineering and architecture. 2012. vol. 6, no. 3, p. 251-267.

²⁴ GENTILE, Guido y VIGO, Daniele. Movement generation and trip distribution for freight demand modelling applied to city logistic. En: European transport. 2013. vol 54, no 6, p. 52-79.

Su segundo modelo es un modelo gravitacional similar al de Nuzzolo, difieren en que este no tiene en cuenta la cantidad de empleados en la zona y se puede complementar con problemas de asignación de ruta, para identificar el flujo adecuado entre origen-destino, y ajustar este para disminuir el tráfico generado por la DUM. Hasta ahora ningún modelo ha trabajado estos problemas juntos.

Los modelos de predicción de demanda de la logística urbana previamente mencionado han sido validados, aplicándolos a una ciudad específica, sin embargo todas las ciudades presentan características económicas muy diferentes, desde su tamaño, hasta el tipo de bienes que maneja. Por lo que Ibeas et al²⁵ hicieron un análisis de transferibilidad para el modelo gravitacional de Nuzzolo. El estudio concluye que no es posible generalizar y transferir los modelos a todas las ciudades, pues su tamaño, estructura y regulaciones influyen altamente en el desempeño del modelo. Así mismo, para tener una predicción de demanda de DUM acertada es necesaria una larga recolección de información de la ciudad a estudiar.

Debido a esta necesidad de hacer un análisis detallado para cada ciudad, con información específica de esta, se han creado modelos de estado de preferencia (*state of preference*) que buscan a través de la recolección de información detallada, comprender de mejor manera el comportamiento de los actores de la logística urbana de mercancía, para a partir de sus decisiones prever su demanda.

Marcucci y Danielis²⁶ dan una guía para el cálculo de la demanda potencial para un centro de distribución, basada en un modelo de estado de preferencia, este recolecta información a través de encuestas a las empresas distribuidoras y transportadores de la zona. El modelo permite hacer un análisis de sensibilidad

²⁵ IBEAS, Angel;, et al. Urban freight transport demand: transferability of survey results analysis and models. En: Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2012. vol 54, p. 1068-1079.

²⁶ MARCUCCI, Edoardo y DANIELIS, Romeo. The potential demand for a urban freight consolidation centre. En: transportation. Diciembre, 2013. vol 35, p. 269-284.

para ver como un cambio en las políticas del centro de distribución varia su posible demanda.

Nuzzolo y Comi²⁷ presentan otro modelo de estado de preferencia, que mide la demanda de cantidad de productos, viajes generados por estos y los vehículos necesarios para su distribución. Al igual que el modelo anterior parte de encuestas a los actores y sus comportamientos, pero complementa esto con matrices origen-destino para comprender mejor el flujo de la mercancía, sus viajes y vehículos. La matriz de mercancía determina la cantidad de flujo entre zonas, la matriz de viajes calcula los tours realizados para la entrega de la mercancía, y la matriz de vehículos mide la cantidad de paradas en un determinado tour, las 3 matrices enmarcadas en cierto periodo de tiempo. Cada matriz es calibrada según la información recolectada en las encuestas.

6.1.2 Modelos de decisiones de inversión en la logística urbana de mercancías Brauers et al²⁸ proponen un modelo discreto multiobjetivo para identificar la mejor inversión en vías, desarrollado con el método MOORA (optimización multiobjetivo en base a análisis de radio). Este método tiene 2 componentes: un sistema de radio y una aproximación al punto de referencia. Para su desarrollo se debe organizar una matriz con una lista de objetivos con sus respectivas alternativas de inversión. El sistema de radio asigna un valor a cada alternativa, cuyo resultado es anclado a esta como un vector, según el objetivo se selecciona el máximo o el mínimo valor posible para cada uno. A partir de esto se hace un ranking con todas las alternativas y como estas ayudan al cumplimiento de los objetivos, la que tenga un mayor valor será la alternativa seleccionada. La

²⁷ NUZZOLO, Agostino y COMI, Antonio. Urban freight demand forecasting: A mixed quantity/delivery/vehicle-based model. En: Transportation Research Part E. 2014. vol 65, p. 84-98.

²⁸ BRAUERS, Willem Karel; *et al.* Multi objective decision making for road design. En: Transport. Junio, 2008. vol 23, no 3, p. 183-193.

principal falla del modelo es que no se pueden agregar coeficientes en los objetivos a cumplir, para dar un peso según su importancia.

Por otro lado Meiduté²⁹ propone un modelo financiero para la evaluación socioeconómica de infraestructura de centros de distribución, ya sea por parte de la administración pública o sector privado. El modelo busca optimizar los escenarios de inversión con la información de servicios a prestar, localización su dimensión, costos, inversión y evaluación financiera. El objetivo es maximizar el retorno del proyecto, calculando su tasa de retorno y flujos de caja, y determinar la mejor fuente de financiación para este.

Se debe calcular la demanda según los servicios que ofrecerá el centro de distribución, y con esto determinar sus costos de equipos y de operación, además de la dimensión y localización es posible hallar sus costos de adquisición y construcción. Los ingresos se calculan según los servicios prestados y la demanda esperada, este momento de evaluación permite tener claro si algunos servicios no son rentables para el centro de distribución, por ejemplo un servicio de almacenaje es poco interesante en una ciudad donde la mayoría de comercio es de alimentos perecederos, pues lo más importante para estas empresas es que su mercancía llegue lo más pronto posible a su destino, por lo que no les interesa que el centro de distribución les ofrezca el servicio de almacenaje. Otro tipo de servicio como la venta de gasolina en los centros de distribución puede ser muy rentable, pues mientras se hacen actividades de carga y descarga en este, se aprovecha este tiempo para tanquear los vehículos, que por lo general tienen un tamaño de tanque grande, por lo que se ahorra un tiempo considerable.

²⁹ MEIDUTÉ, Leva. Economical evaluation of logistics centres establishment. En: Transport. Febrero, 2007. vol 22, no 2, p. 111-117.

Yamada et al³⁰ proponen un modelo para evaluar problemas de inversión de la logística urbana, que brinda la mejor combinación de acciones a realizar y mide el impacto que estas decisiones generarán en el tráfico, que es uno de los mayores problemas de la DUM. El modelo trata un problema DNDP (problema de diseño de redes discreto), con una programación de dos niveles. El nivel alto optimiza la combinación de acciones a implementar y el nivel bajo se encarga de la asignación del tráfico en la respectiva acción.

El nivel alto presenta un problema de optimización combinatorio, que busca maximizar la relación costo/beneficio de las posibles mejoras a implementar. Para seleccionar la combinación óptima de mejoras el problema se soluciona con el método heurístico GLS (*Genetic Local Search*), un híbrido que combina el Algoritmo genético con el *local search*. En el nivel bajo se seleccionan las rutas para los usuarios que se espera que usen la infraestructura, y mediante una matriz jacobiana permite conocer el flujo que se presentará entre todos los puntos a evaluar.

6.1.3 Modelos de optimización para la localización de facilidades logísticas

La mayoría de ciudades grandes cumplen con altos volúmenes de mercancía, densidad poblacional, múltiples industrias y actores, sin embargo no siempre hay integración entre ellos, ni políticas que fomenten esa unión; esta interacción entre actores también se debe tener en cuenta pues influyen en el desempeño del centro logístico. Estudios realizados por Olsson y Woxenius³¹ demuestran el caso de ciudades con gran desarrollo económico en Canadá, donde la construcción de

³⁰ YAMADA, Tadashi; *et al.* Designing Multimodal Freight Transport Networks: A heuristic Approach and Applications. En: Transportation science. Mayo, 2009. vol 43, no 2, p. 129-143.

³¹ OLSSON, Jerry y WOXENIUS, Johan. Localisation of freight consolidation centres serving small road hauliers in a wider urban area: barriers for more efficient freight deliveries in Gothenburg. En: Journal of transport Geography. 2014. vol 34, p. 25-33.

facilidades logísticas no generaría ningún impacto en su distribución de mercancías, por lo que no se hizo inversión en estas; mientras que en otras ciudades, como Chicago en Estados Unidos, la creación de facilidades logísticas causaría una reducción del 5,6% tráfico en la ciudad.

El método gravitacional descrito por Skrinjar, Rogie y Stankovic³² se usa desde el siglo XX para determinar la localización adecuada de facilidades logísticas, específicamente de bodegas de distribución, aún es ampliamente usado en fases preliminares de estudios de localización para estudiar áreas factibles. Este método organiza a los clientes en coordenadas según su ubicación y asigna un peso a cada uno dado por su demanda, a partir de esto halla un punto central para ubicar bodegas de distribución de tal forma que se minimicen los costos de distribución. Su solución por lo general no es la óptima, pero sirve como punto de partida para aproximaciones a soluciones óptimas.

A partir de este método se han creado diferentes modelos para tratar el problema de la localización de facilidades logísticas de una mejor manera.

El modelo típico para la localización de centros logísticos, trabajado por Morton Okelly³³ usa la programación lineal entera para minimizar los costos de transporte asociados a la distribución de mercancías. Para este problema se considera la ubicación de los clientes y proveedores como nodos, a cada nodo se le asigna un peso, identificando las distancias y costos de transporte entre ellos. El problema selecciona como punto de localización los nodos donde se den los menores costos de todas las combinaciones posibles. Si bien el problema se desarrolló inicialmente para la minimización de los costos de transporte, también se puede plantear para que busque la minimización de tiempo, retrasos o distancia total recorrida, según la función que cumpla la facilidad a localizar.

³² SKRINJAR, Jasmina. ROGIE, Kristijan y STANKOVIC, Ratko. Location of urban logistic terminals as hub location problem. En: Traffic&Transportation. 2012. Vol. 24, No. 5, 433-440

³³ O'KELLY, Morton. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. En: European Journal of Operational Research. 1987. Vol 32, p. 393–404.

El mismo Morton Okelly³⁴ hace mejoras al modelo que luego puede ser planteado como un problema lineal combinado que da a conocer el número de bodegas que se deben instalar y en qué puntos. Se contemplan dos variables de decisión: la primera, una variable binaria que determina si se debe instalar o no una facilidad logística en ese punto. La segunda indica la cantidad de mercancía que se deben transportar entre nodos, de lo cual se obtiene la capacidad requerida para cada facilidad a instalar.

Hay métodos matemáticos exactos para una solución óptima del problema de localización, o métodos heurísticos, el más popular de estos es el algoritmo genético trabajado por Topcuoglu et al³⁵, que da buenos resultados aunque no garantiza la solución óptima. Algunos métodos de prueba y error también son aplicables a este problema de programación lineal, como el *branch and bound* o *branch and cut* trabajado por Labbé, Yaman y Gourdin³⁶, los cuales asumen una combinación inicial como solución, y va comparando con soluciones diferentes, si la nueva solución es mejor que la inicial, se asume como la óptima, se descarta la solución previa y se repite el proceso hasta que no se encuentre una solución mejor. La gran cantidad de nodos que se deben considerar en un problema real, hace el problema de localización muy complejo, pues toma mucho tiempo encontrar este tipo de soluciones a los computadores.

La ubicación de facilidades logísticas es afectada por múltiples criterios, sin embargo en un estado del arte de modelos de localización de facilidades logísticas por Alumur y Kara³⁷ para el 2007 ningún modelo manejaba este problema de

³⁴ OKELLY, Morton. Hub facility location with fixed costs. En: Papers in Regional Science . 1992. vol 71, p. 293–306.

³⁵ TOPCUOGLU, H. *et al.* Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms. En: Computers & OR. 2005. vol 32, p. 967–984.

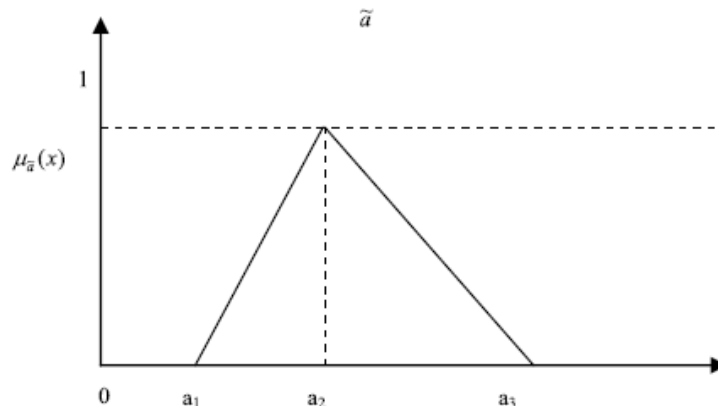
³⁶ LABBÉ, Martine; YAMAN, Hande; y GOURDIN, Eric. A branch and cut algorithm for the hub location problems with single assignment. En: Mathematical Programming. 2005. Vol 102, p. 371–405

³⁷ ALUMUR, Sibel y KARA, Bahar. Network hub location problem: the state of the art. En: European journal of operational research. 2008. Vol 190, p. 1-21.

manera multi-criterio. Por otro lado muchos parámetros son considerados determinísticos, a pesar que presentan un alto grado de incertidumbre y es importante tener en cuenta la variación de estos datos.

Awasthi, Chauan y Goyal³⁸ dan una distribución Fuzzy a parámetros que son difíciles de incluir en el modelo porque usan palabras en vez de números. La solución del modelo busca una localización donde los beneficios sean maximizados y los costos minimizados. Después de seleccionar cuales parámetros se van a tener en cuenta para el criterio de evaluación se debe asignar a cada uno un peso dado por expertos, con los resultados de esta evaluación se puede saber la distribución de cada variable, que se considera triangular para las variables *fuzzy*. La gráfica 2 ejemplifica los límites de la distribución (inferior y superior), dados por el menor y mayor valor obtenido en la evaluación (a_1 y a_3 , respectivamente), entre más pequeño sea este rango se considera que hay menor incertidumbre en el parámetro. El promedio de los resultados se asume como el valor más probable (a_2).

Gráfica 2. Número triangular fuzzy \tilde{a}



³⁸ AWASTHI, Anjali; CHAUAN, Ss y GOYAL, Sk. A multicriteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. En: Mathematical and computer modeling. Julio, 2010. vol 53, p. 98-109.

Fuente: A multicriteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty

Una vez evaluados los múltiples criterios para cada alternativa, se organizan en una matriz, los resultados se comparan con la metodología *Fuzzy TOPSIS*, que selecciona la alternativa más cercana a la ideal y más lejana a la negativa. Esta metodología también permite hacer un análisis de sensibilidad del peso asignado a cada criterio, para analizar su importancia y efecto en la decisión.

Actualmente uno de los criterios más importantes a tener en cuenta en la DUM es el factor ambiental, por lo que Mohammadi, Torabi y Tavakkoli³⁹ dan un modelo que ayuda a la creación de una red de transporte de mercancías sostenible, con la localización de hubs con incertidumbre mixta (trabaja con variables determinísticas, *fuzzy* o probabilísticas). El modelo no tiene un enfoque únicamente económico, sino también ambiental y social, teniendo en cuenta índices de emisión de gases y ruido. Para tratar de manera adecuada el problema de contaminación, se mencionan 4 factores que afectan la emisión de gases en el transporte (tipo de vehículo, diseño de la red de distribución, equipo y combustible empleado).

El modelo tiene en cuenta los costos de transporte e instalación y asocia a la emisión de ruido y contaminación un costo de “castigo”. Los costos de emisión se asume que vienen de dos fuentes: el hub y del recorrido que hace el vehículo durante la distribución. El costo de ruido solo se genera si los niveles de ruido pasan de un punto de referencia, este puede estar dado por políticas o la opinión de expertos. Con programación estocástica probabilística y la unión de costos mencionados sale la función a minimizar. Aplicando métodos de transformación a las variables con distribución *fuzzy* y *poisson* del problema, estas se integran y

³⁹ MOHAMMADI, M; TORABI, S Y TAVAKKOLI-MOGHADDAM. Sustainable hub location under mixed uncertainty. En: Transportation research part E. Diciembre, 2013. vol 62, p 89-115.

asumen valores probables, lo que convierte el modelo en un problema de programación lineal convencional.

El autor da dos posibles soluciones meta heurísticas: recocido simulado y un algoritmo competitivo imperialista. El recocido simulado haya una solución aleatoria y la asume como optima, mediante interacciones de datos de su vecindario encuentra nuevas soluciones hasta no encontrar un mejor resultado. Por otro lado el algoritmo competitivo imperialista se basa en comportamientos socio-políticos, este asemeja los costos con países, los costos más significativos son definidos como países imperialistas, el algoritmo va dando una jerarquía a los costos hasta que todos estén integrados como una colonia, adaptándose a los costos que tienen más poder.

Al comparar resultados con modelos de localización donde se tienen en cuenta solo los costos de transporte y localización, estos presentan un incremento, pero disminuye otros gastos directos e indirectos sociales, lo que lleva a una disminución del costo total.

6.2 MODELOS DE OPTIMIZACIÓN TÁCTICOS Y OPERACIONALES DE LA LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS

A continuación se muestra la evolución que se ha dado en los modelos para la programación de la logística urbana de mercancías:

Por lo general la distribución de mercancías dentro de las ciudades se realiza en vehículos, pero algunas ciudades cuentan con infraestructura que hace posible la DUM por otros medios, por ejemplo Joborn et al⁴⁰ trabaja la programación de

⁴⁰ JOBORN, Martin; *et al.* Economies of scale in empty freight car distribution in cheduled railways. En: Transportation science. Mayo, 2004. vol 38, no. 2, p. 121-134.

trenes, basado en un modelo de economía a escala, de tal manera que se transporte la mayor cantidad de mercancía posible y reduciendo los viajes con carga desaprovechada. El objetivo del modelo es la minimización de costos, asignando a cada segmento entre estaciones, que es considerado un *arc*, un costo. Debido a las pocas opciones que se tienen, la elección de rutas no es compleja en el transporte de rieles, pero programar las horas de salida de los trenes sí lo es. El autor relaja el problema hallando la solución con la búsqueda Tabú y no con el método de branch and bound como comúnmente se hace, teniendo resultados positivos y más rápidos que con el método tradicional.

El modelo básico para la programación de rutas de vehículos es conocido como el *Vehicle Routing Problem VRP*, trabajado por primera vez por Dantzig y Ramser⁴¹ su objetivo es determinar la ruta en que se deben visitar los clientes, minimizando los costos de transporte teniendo en cuenta las restricciones de capacidad de carga del vehículo. El modelo considera a cada cliente un nodo, a los cuales se debe asignar una demanda y distancia entre ellos. La solución óptima del modelo se puede hallar con métodos matemáticos exactos, pero muchos autores prefieren trabajar con algoritmos heurísticos o meta heurísticos para hallar soluciones reales cercanas al valor óptimo

A partir de este problema se han cambiado y agregado variables a los modelos de ruteo para un resultado en la programación de operaciones más acertado. Las primeras modificaciones que se hicieron fueron con la intención de mejorar el uso que se le daba a la capacidad de los vehículos para realizar una distribución de mercancías más efectiva o de la infraestructura disponible, pues es imposible llevarle el paso al aumento de vehículos que se da en las vías.

⁴¹ DANTZIG, G., y RAMSER, J. The truck dispatching problem. En: Management Science. 1959, vol. 6, p. 80–91.

6.2.1 Modelos de programación para optimización de la capacidad Shah et al⁴² proponen un modelo para mejorar el uso que se le da a la infraestructura disponible, haciendo máximo provecho de su capacidad. El problema se modela con programación entera, haciendo una maya de las vías disponibles para el transporte de mercancías, estas vías se agrupa en pequeños grupos formado diferentes “pelotones”, para cada pelotón se debe conocer su tiempo de recorrido y tiempo de posibles esperas en intersecciones. El modelo tiene dos formas: el *Fixed platoon* que calcula el tiempo de ejecución según velocidades esperadas y el *Fixed period* que se halla calculando promedios de tiempos reales.

La solución óptima se puede hallar con el método solver del software CPLEX, sin embargo el autor propone el algoritmo *fixed platoon length variable period algorithm* porque es posible trabajar problemas más grandes. La heurística desarrollada por el autor, escoge los “pelotones” con menor tiempo de recorrido, evitando que se aglomeren los vehículos en las intersecciones durante la distribución, mejorando así el uso de la infraestructura disponible. El planeamiento con *fixed platoon* reduce los tiempos de espera, mientras que el *fixed period* da un menor tiempo total.

Por otro lado Kirlik y Sipahioglu⁴³, agregan al modelo los recorridos que hace el vehículo con carga vacía, esto con el fin de disminuir la distancia recorrida en la que se desaprovecha la carga del vehículo. El autor no usa el modelo de nodos para el ruteo sino por arcos (*arc-routing problem*). Este problema agrupa los clientes que se deben visitar en segmentos denominados *arcs*, la búsqueda tabú es el método más usado para escoger los segmentos que presenten la menor distancia, pero se han desarrollado múltiples métodos para su solución como la

⁴² SHAH, Nirav, *et al.* Optimization models for assessing the peak capacity utilization of intelligent transportation systems. En: European Journal of Operational Research. Junio, 2011. vol 216, p. 239-251.

⁴³ KIRLIK, Gokhan y SIPAHIOGLU, Aydin. Capacited arc routing problema with deadheading demands. En: Computers & operations research. 2012. vol 39, p. 2380-2394.

búsqueda Tabú determinística, algoritmo memético y la optimización de colonia de hormigas entre otros.

El modelo conocido como CARPDD (*Capacitated arc-routing problem with deadheading demands*) es un problema lineal entero y se propone la heurística de *Ulusoy Partitioning* para su solución, esta tiene dos fases, la primera forma la red de segmentos disponibles para hacer los recorridos y la segunda selecciona las rutas de menor distancia, para esta segunda fase el autor describe la complejidad de cuatro algoritmos que pueden ser usados (CCP, RPP, CHORTEM Y CONSTRUCTION). Además para garantizar un resultado óptimo se exponen 2 algoritmos post-optimización que traen mejoras de hasta el 12% en los resultados de las rutas.

Con el mismo fin de disminuir el tiempo que los vehículos viajan solos, Behrens y Picard⁴⁴ proponen un modelo económico para encontrar un equilibrio en la carga que debe tener la distribución de mercancías para maximizar las ganancias de los productores, para esto se debe garantizar que la demanda vaya en ambas direcciones, y tener una cantidad mínima de mercancía de regreso para que se realice un recorrido.

El modelo encuentra el equilibrio con un coeficiente dado según la demanda y distribución de la ciudad, se contemplan ciudades “capitalistas” que tienen regiones homogéneas y la distribución se debe dar por toda la ciudad, y ciudades “capacitadas” donde los fabricantes o comerciantes de cierto tipo de producto se encuentran aglomerados. El modelo tiene la restricción que solo contempla el equilibrio para un solo tipo de producto, pues todo el equilibrio lo basa en datos económicos de las ciudades.

⁴⁴ BEHRENS, Kristian y PICARD, Pierre. Transportation, freight rates, and economic geography. En: Journal of International Economics. Junio, 2011. vol 85, p. 280-291.

6.2.2 Modelos de programación para optimización de la cantidad de vehículos

La mayoría de VRP programa las rutas para un solo vehículo o para flotas homogéneas, sin embargo ciertas mercancías requieren vehículos con características específicas, por lo que Perrier, Langevin y Amaya⁴⁵ trabajan un modelo basado en redes para múltiples productos, el modelo restringe algunas rutas para cierto tipo de vehículos y busca minimizar las distancias para todas las rutas. Los autores proponen dos métodos de optimización, uno es un algoritmo paralelo que divide el problema en sub-problemas y asigna las rutas para cada uno, el segundo método divide la red en grupos, cada uno con una demanda similar, y asigna a cada nodo de la red un vehículo que pueda atender el nodo, y luego los une para generar las rutas.

Para calcular la cantidad de vehículos óptima, Pureza, Morabito y Reimann⁴⁶ se apoyan en la teoría que para cumplir con el tiempo en una distribución no necesariamente se deben aumentar la cantidad de vehículos, sino agregar trabajadores que hagan labores de carga y descarga, lo que reducirá en gran manera los tiempo totales de la ruta, permitiendo cumplir los requerimientos en más lugares con la misma cantidad de vehículos, el modelo propuesto VRPTWMD tiene tres variables, busca minimizar costos, distancias de la ruta y asignar la cantidad de empleados necesaria a cada vehículo. Se propone para su solución la búsqueda tabú y ACO *ant colonization problem*, con algoritmos que ya han sido probados para problemas similares con dos variables. Los resultados del modelo permiten ver una mejora en los tiempos de las rutas aumentando la fuerza laboral de los vehículos, sin embargo la reducción del tiempo por empleado está basado en suposiciones, para tener un resultado más verídico se deberían tomar tiempos

⁴⁵ PERRIER, Nathalie; LANGEVIN, André y AMAYA, Ciro-Alberto. Vehicle Routing for Urban Snow plowing operations. En: Transportation science. Febrero, 2008. vol 42, no 1, p. 44-56.

⁴⁶ PUREZA, Victoria, MORABITO, Reinaldo y REIMANN, Marc. Vehicle routing problem with mutiple deliverymen: modeling and heuristic approaches for the VRPTW. En: European journal of operational research. Diciembre, 2011. vol 218, p.636-647

reales para observar qué tanto afecta agregar un trabajador el tiempo de actividades de carga/descarga.

Otro modelo basado en carga laboral es el de Boonprasurt y Nanthavanij⁴⁷, cuyo modelo determina el tamaño de carga y rutas de entrega óptimas. El autor trabaja dos prototipos del modelo, el VRPMMH-FWA (*vehicle route problem with manual materials handling with fixed work assignment*) y el VRPMMH-FLW (*vehicle route problem with manual materials handling with flexible work assignment*). La diferencia es que el primer modelo trabaja con una cantidad de trabajadores fija, y el segundo asigna los trabajadores según la demanda, pero se plantean y se resuelven de la misma forma.

Para ambos modelos se debe conocer la capacidad de todos los vehículos, las distancias que hay entre la bodega y la demanda de los clientes. El objetivo es disminuir los costos, que se considera que vienen del salario de los empleados y el combustible consumido. El problema se construye bajo el modelo matemático minsum y se halla la solución con una herramienta de optimización llamada LINGO. Ambos modelos dan resultados en las rutas similares, pero el FWA presenta una mejor distribución en la fuerza de trabajo.

La distribución de mercancías es considerada la “última milla” de la cadena logística, a pesar de esto la mayoría de modelos para la programación de la distribución no tienen en cuenta el funcionamiento de toda la cadena, por lo que Aized y Srai⁴⁸ sugieren un modelo jerárquico de tres fases para la programación y planeación adecuada de la última milla de la cadena logística. La primera fase define la zona que será atendida, la segunda los vehículos necesarios para la distribución y la tercera las rutas, programadas con un modelo dinámico que permite modificarlas en caso que un vehículo se averíe.

⁴⁷ BOONPRASURT, Prachya y NANTHAVANIJ, Suebsak. Optimal fleet size, delivery routes and workforce assignments for the vehicle routing problem with manual materials handling. *En: International Journal of Industrial Engineering*. 2012. vol 19, p. 252-263.

⁴⁸ AIZED, Tauseef y SRAI, Jagjit. Hierarchical modelling of last mile logistic distribution system. *En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. vol 70, p. 1053-1061.

6.2.3 Modelos de programación para optimización del backhaul Yu y Dong⁴⁹

formulan un modelo para optimizar las rutas de *backhaul* con un algoritmo genético basado en el *backhaul VRP*, para maximizar las ganancias sin violar la ventana de tiempo y capacidad del vehículo, que identifica primero las rutas de distribución para un solo vehículo y segundo la mejor programación para estas.

El manejo que requieren ciertos productos y regulaciones actuales de medio ambiente hace que compañías hoy día deban considerar su cadena logística de manera bidireccional, es decir entregar y recolectar mercancías en cierto punto, lo que hace más complejo el uso de la capacidad en la distribución de mercancías, muchas cadenas logísticas hacen aparte la entrega y la recolección de esta, sin embargo para una distribución más efectiva es mejor realizar la entrega y recolección de mercancía simultáneamente, este modelo es conocido como el *Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick ups (VRPSDP)*.

En situaciones reales no siempre es posible hacer la recolección de toda la mercancía demandada, por lo que se deben escoger según la capacidad de los vehículos disponibles, a cuales clientes hacer la recolección. Para esto Aras, Aksen y Tekin⁵⁰ formulan un modelo con programación lineal entera mixta, agregando un precio por servir a ciertos clientes, según los beneficios económicos (basado en distancias recorridas) que trae recoger mercancías en esos puntos, para hallar las rutas y los lugares donde se debe hacer entrega y recolección se usa un método heurístico basado en la búsqueda tabú. Gribkovskai, Laporte y Shyshou⁵¹ aplican este mismo modelo para el problema de recolección de botellas

⁴⁹ YU, Junfang y DONG, Yuanyuan. Maximizing profit for vehicle routing under time and weight constraints. En: International Journal of Production Economics. Mayo, 2013. Vol 145, p. 573-583

⁵⁰ ARAS, Necati; AKSEN, Deniz Y TEKIN, Mehmet. Selective multi-depot vehicle routing problem with pricing. En: Transportation research part C. Agosto, 2010. vol 19, no 5, p. 866-884.

⁵¹ GRIBKOVSKAIA, Irina; LAPORTE, Gilbert y SHYSHOU, Aliaksaridr. The single vehicle routing problema with deliveries and selective pickups. En: Computers & operations research. Septiembre, 2008. vol 35, no. 9, p. 2908–2924

de plástico reciclables, y sugiere otro algoritmo basado también en la búsqueda tabú con resultados muy cercanos al óptimo.

Ruan, Lin y Kawamura⁵² formulan un modelo para programar en forma de cadena las rutas con *delivery and pick ups* que un vehículo deba realizar en el día. Para el modelo se tienen en cuenta las rutas ya programadas, las características de los bienes transportados y los requerimientos operacionales de cada ruta. Se proponen 3 metodologías para modelar el problema: *nested logit*, *mixed logit* y *multimodal logit*. La programación por cadena de rutas se comparó con rutas individuales y se observó que el modelo con mejor desempeño en la reducción de costos es el *multimodal logit*, sin embargo este planteamiento tan general del problema de ruteo no tiene en cuenta muchos factores reales que afectan a cada ruta, por lo que se aconseja este tipo de modelo para entender ciertos comportamientos de la distribución de mercancía, mas no para la programación de rutas de distribución.

Lin et al⁵³ desarrollan un modelo de optimización para el problema de ruteo con entrega y recolección simultanea (VRPSDP), con el fin de reducir costos ambientales y económicos. El modelo tiene dos variantes, en la primera el transportador recoge toda la mercancía que haya (*full pick up*) y la otra recoge lo que pueda según su capacidad de carga (*partial pick up*).

El modelo se estructura en 3 módulos, en el primero se hace la recolección de información como ubicación de clientes, demanda, capacidad y consumo de combustible de vehículos. Con la información recolectada, se formula el modelo, cuyo objetivo es la minimización de distancias, y se usa el algoritmo genético para hallar las mejores rutas. El tercer módulo agrega los otros factores a tener en cuenta en el modelo, como el costo económico (especialmente consumo de

⁵² RUAN, Minyan; LIN, jie y KAWAMURA, Kazuya. Modeling urbean comercial vehicle daily tour chaining. En: Transportation research part E. Febrero, 2012. vol 48, p. 1169-1184

⁵³ LIN, Canhong, et al. A genetic algorithm-based optimization model for supporting Green transportation operations. En: Exert systems with applications. 2014. vol 41, p.3284-3296.

gasolina y salario transportadores) y costos ambientales (emisión de CO₂), y a través de una comparación escoge las rutas con menor costo total. Según aplicaciones de este modelo, la modalidad *full pick up* presenta un menor costo total, aunque se recorran más distancias que en el *partial pick up*, además permite concluir que los vehículos muy grandes no resultan beneficiosos para la distribución de mercancías, desde un enfoque ambiental.

6.2.4 Modelos de programación con variables estocásticas Chen et al⁵⁴ proponen dos modelos probabilísticos basados en la idea que si se trazan rutas para largos periodos de tiempo, estas se vuelven más eficientes, pues hay más familiaridad con estas y propone dos modelos de arc-routing teniendo en cuenta la probabilidad de visitar ciertos segmentos en determinado periodo de tiempo. El primer modelo (PARM) asigna a cada segmento una probabilidad de ser visitado según datos históricos, y el segundo (MARM) la probabilidad de los segmentos de ser visitados según el día de la semana. La solución de ambos modelos se halla con el método de búsqueda local. El modelo MARM es más útil pues da rutas para cada día, que se apegan más a la realidad de la demanda, además aunque organizar la información para encontrar la probabilidad diaria puede ser complejo, encontrar su solución es más rápido.

Tricoire, Graf y Gutjahr⁵⁵ presentan un modelo estocástico bi-objetivo con el fin de disminuir los costos de transporte y minimizar el porcentaje de demanda sin suplir. Se considera un problema estocástico porque a la demanda se asignan variables aleatorias, por la incertidumbre que presenta este dato. Para minimizar la demanda insatisfecha, en cada centro de distribución se identifican cuantos clientes no se van a suplir porque no están cerca o por falta de capacidad en los

⁵⁴ CHEN, Si, et al. Arc-routing models for small package local routing. En: Transportation science. Febrero, 2009. vol 43, no. 1, p. 43-55.

⁵⁵ TRICOIRE, Fabien; GRAF, Alexandra y GUTJAHR, Walter. The bi-objective stochastic covering tour problem. En: Computers & operational research. Septiembre, 2011. vol 39, p. 1582-1592.

vehículos. El modelo determina a cuales centros de distribución suplir y en qué orden, hallando soluciones de Pareto, es decir que se pueden cambiar el resultado óptimo de un objetivo sin afectar el otro, con una metodología heurística basada en el *epsilon-constrain* (ECM).

Zhang, Chaovalitwongse y Zhang⁵⁶ brindan un resumen de la evolución que ha tenido el VRP con variables estocásticas, a partir de estos cambios genera un modelo VRPSPD con el tiempo de recorrido como una variable estocástica. Para su solución el autor compara los resultados de la búsqueda dispersa (*Scatter search*) con los del algoritmo genético que es la metodología comúnmente usada para este tipo de problemas, concluyendo que la búsqueda dispersa es más flexible para problemas combinatorios y da mejores soluciones.

Ghannadpour, Noori y Tavakkoli⁵⁷ dan un resumen de la evolución de modelos VRP con variables fuzzy, y formulan un modelo dinámico multiobjetivo, considerando el tiempo que se demoran los recorridos y satisfacción del cliente como variables con distribución *fuzzy*. El modelo busca optimizar la cantidad de vehículos, y rutas minimizando la distancia y tiempos de recorrido, y maximizar el nivel de satisfacción de los clientes entregando la mercancía a la hora más adecuada. La distribución de variables fuzzy se calcula con datos históricos. Su solución se halla con 3 módulos siguiendo la metodología del algoritmo genético, y con la ayuda de dos algoritmos desarrollados por el autor para poder modificar las rutas en tiempo real según la nueva demanda de mercancía que se genere durante la distribución. Pocos modelos multiobjetivos se han desarrollado para el VRP, el desempeño de este modelo comparado con otros con un solo objetivo o

⁵⁶ ZHANG, Tao; CHAOVALITWONGSE, W.A y ZHANG, Yuejie. Scatter search for the stochastic travel-time vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. En: Computers & operations research. Diciembre, 2011. vol 39, p. 2277-2290.

⁵⁷ GHANNADPOUR, Seyed; NOORI, Siamak y TAVAKKOLI-MOGHADDAM, Reza. Multiobjective dynamic vehicle routing problema with fuzzy travel times and customers satisfaction in supply chain management. En: Transactions on engineering management. Noviembre, 2013. vol 60, no 4, p. 777-790.

bi-objetivo presentan poca diferencia en las rutas, simplemente este trae una mayor satisfacción de los clientes.

6.2.5 Modelos de programación dinámicos A pesar de usar variables estocásticas en el planteamiento del problema, es imposible conocer con exactitud cómo se van a presentar situaciones del tráfico o de la demanda, que tienen un alto nivel de incidencia en la DUM, por lo que se hizo necesario agregar al problema un factor dinámico. Avances en las tecnologías de información han resultado valiosos para tratar el problema de ruteo de manera dinámica dando lugar a modelos que tienen en cuenta las variaciones en tiempo real que se pueden presentar durante la distribución de mercancías, estos son conocidos como DVRP (*dynamic vehicle routing problem*).

Hu y Sheng⁵⁸ tienen un modelo que se considera dinámico, que optimiza la asignación de bienes cada vez que se haga una entrega o se recoge mercancía, el modelo trabaja la asignación de bienes a los vehículos con el fin de minimizar los índices de carga vacía. El modelo holístico integra comportamiento de transportadores, características de bienes, capacidad de carga de vehículo y asignación de rutas con programación multiobjetivo lineal entera mixta.

El autor desarrolla 3 algoritmos, uno para generar el mapa con las posibles rutas para la distribución en la ciudad con sus respectivas distancias, otro para asignar de manera óptima los bienes a cada vehículo mediante una matriz de carga, y un tercero para que se realice el recorrido cumpliendo una ventana de tiempo, recorriendo la menor distancia posible, haciendo una comparación con matrices de distancia y de tiempo.

⁵⁸ HU, Zhi-Hua y SHENG, Zhao-Han. A decision support system for public logistics information service management and optimization. En: Decision support systems. Diciembre, 2013. vol 59, p.219-229.

El modelo dinámico de Yan, Lin y Lai⁵⁹ permiten ajustar las rutas de distribución durante las operaciones, considerando también la demanda una variable dinámica. El modelo se desarrolla con una heurística de ajuste de variables de dos fases, en la primera se hace una planeación con la demanda que se tenga prevista, minimizando los costos, teniendo en cuenta un costo de penalización si no se satisface la demanda dentro del tiempo establecido. La segunda fase hace el ajuste en tiempo real con una metodología sistemática, las nuevas demandas tienen un costo de penalización más bajo y se calcula un índice de cambio de la ruta, que se minimiza con el fin de cambiar poco la ruta inicial. La solución se halla con el método CPLEX MIP, los resultados del modelo comparados con el modelo determinístico de ruteo con ventana de tiempo, presentan un mejor desempeño en situaciones reales.

Otra variable que debe ser considerada dinámica durante la DUM por su alto grado de incertidumbre es el tiempo de recorrido, Hsu y Lin⁶⁰ crearon un sistema inteligente para solucionar el problema de ruteo de vehículos con límite de capacidad. El sistema inteligente se desarrolló a partir de un algoritmo híbrido con AIS (*artificial immune systems*) y el algoritmo genético. El modelo hace mutaciones, imitando el comportamiento del sistema inmune, seleccionando como posibles soluciones los cromosomas “antígenos” y descartando los cromosomas “anticuerpos”. Tecnologías como el GPS, EDI, ITS y GIS, son usadas para determinar los tiempos de distribución de manera dinámica.

Liao y Hu⁶¹ también tienen en cuenta las variaciones del tiempo en un modelo de asignación de rutas en tiempo real. El problema se trata en dos módulos, el

⁵⁹ YAN, Shangyao; LIN, Jenn-Rong y LAI, Chun-Wei. The planning and real-time adjustment of courier routing and scheduling under stochastic travel times and demands. En: *Transportation research part E*. Enero, 2013. vol 53, p. 34-48

⁶⁰ HSU, Li-fu; HSU, Chiun-Chie y LIN, Tsai-Duan. An intelligent artificial system: artificial immune based hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problema. En: *applied mathematics & information sciences*. Octubre, 2013. vol 8, no. 3, p. 1191-1200.

⁶¹ LIAO, Tsai y HU, Ta-Yin. An object-orientate evaluation framework for dynamic vehicle routing problems under real-time information. En: *Expert systems with applications*. 2011. vol 38, p. 12548-12558.

primero se encarga de asignar la mercancía a los vehículos, mediante el método *sweep*, que agrupa nodos cercanos para un vehículo y después asigna el orden en que deben ser visitados. Esta información de rutas se almacena en un simulador, y mientras los vehículos hacen su recorrido, con dispositivos se recoge información del estado del tráfico, con esta se actualizan los tiempos en una matriz. En el segundo módulo se usa esta matriz para actualizarán las rutas con el algoritmo de búsqueda Tabú. La aplicación de este modelo permite asegurar que evitar vías congestionadas sí mejora la calidad de las rutas y entre más clientes tenga que visitar un vehículo, más posibilidades de cambio de ruta tiene, lo que podrá traer mayores reducciones en el tiempo total de recorrido.

Los problemas de ruteo con ventana de tiempo también han sido trabajados de forma dinámica por Taniguchi y Shimamoto⁶² cambiando tiempo de viaje, para distribución con entrega y recolección simultánea, resuelto con algoritmo genético.

Mu et al⁶³ tienen en cuenta los accidentes que se puedan presentar durante la distribución de mercancías y modela el problema si un vehículo es inmovilizado. El problema es conocido como *Disrupted Capacitated Vehicle Routing Problem with Vehicle Breakdown(DCVRP-B)*. El objetivo del modelo es minimizar los vehículos usados para realizar las entregas que debía hacer el vehículo averiado y sus distancias recorridas. Para su solución los autores proponen dos algoritmos metaheurísticos basados en la búsqueda Tabú. Mamasis, Minis y Dikas⁶⁴ trabajan un modelo para el mismo problema, pero este supone que no hay vehículos de refuerzo en caso de averío, por lo que algunos clientes puedan quedar sin recibir su mercancía, el autor tiene en cuenta esto y asigna un orden de importancia a los clientes para que se entreguen los pedidos más urgentes, y propone un algoritmo

⁶² TANIGUCHI, Eiichi y SHIMAMOTO, Hiroshi. Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. En: Transportation research part C. 2004, vol 12, p. 235-250.

⁶³ MU, Quianxin; et al. Disruption management of the vehicle routing problem with vehicle breakdown En: Journal of the Operational Research Society. 2010. vol 64, no 4, p. 742-749.

⁶⁴ MAMASIS, K; MINIS, I y DIKAS, G. Managing vehicle breakdown incidents during urban distribution of a common product. En: Journal of the Operational Research Society. 2013. vol 64, p. 925-937.

heurístico llamado *fast label* que elige a cuales clientes servir, con cual vehículo y de qué manera (es decir si debe volver a la bodega o distribuir desde donde está el vehículo averiado), minimizando los costos de distribución.

El ruteo dinámico también ha sido trabajado en problemas tan específicos como la programación de vehículos grandes en proyectos de construcción de infraestructura, los cuales generan un aumento en el tráfico de las ciudades, tráfico que se puede mitigar con una buena programación de trabajo. Lee⁶⁵ desarrolló un modelo que busca reducir el impacto de los vehículos de carga pesada necesarios para la ejecución del proyecto en el tráfico y consta de dos partes: una simulación calculando el impacto de la programación en el tráfico y un algoritmo para encontrar la mejor programación. Para lo cual usa el algoritmo ACO (*ant colony optimization*) que determina el nuevo flujo del tráfico basado en el principio que el comportamiento de las hormigas y los humanos son iguales, y las nuevas rutas se van a dar según el camino que escoja la mayoría de vehículos. Las diferentes programaciones posibles se simulan en el software y se selecciona la que de menor aumento del tráfico. La aplicación del modelo en la vida real deja ver que una buena programación de trabajo de vehículos de carga pesada reduce en gran porcentaje el tráfico generado por estos y que asignar más trabajadores de los necesarios a un proyecto puede hacer que este termine más rápido, pero genera más tráfico.

En el futuro se espera que los vehículos sean automatizados, por lo que debe haber una programación y ruteo sincronizado perfectamente para evitar accidentes, por esto Giridhar y krumar⁶⁶ formulan un modelo para la reasignación de una programación para tráfico automatizado que puede ser usado en tiempo real y necesita pocas rutas conocidas en el futuro para hacer la programación, de

⁶⁵ LEE, Hsin-Yun. Optimizing schedule for improving the traffic impact of work zone on roads. *En: Automation in Construction*. Mayo, 2009. vol 18, p. 1034–1044.

⁶⁶ GIRIDHAR, Arvind y KRUMAR, P. R. Scheduling Automated Traffic on a Network of Roads. *En: IEEE transactions on vehicular technology*. Septiembre, 2006. vol 55, no 5, p. 1467- 1474.

tal forma que se haga la entrega de la mercancía en el menor tiempo posible, evitando generar tráfico.

El modelo estudia el flujo de vehículos de manera micro y es discreto en tiempo y espacio, para su desarrollo se debe hacer un mapa de las diferentes vías que van a usar las rutas, y la programación se hace con ayuda de un algoritmo polinomial subóptimo de tiempo, el cual según las rutas a cumplir va seleccionando los caminos a usar, escogiendo los de menor distancia primero. El algoritmo da una solución óptima local, que por lo general es la misma óptima global. El modelo permite realizar cambios que se presenten en las rutas de distribución. La principal falla del modelo es que trabaja con suposiciones en las velocidades que los vehículos van a tener en las calles, lo cual es un dato muy incierto y puede traer grandes variaciones en los tiempos de la distribución.

Muchos modelos y algoritmos para problemas de ruteo dinámico no son flexibles en situaciones reales, por lo que a pesar de tener información en tiempo real no se obtienen buenos resultados, por esto Hu, Sun y Liu⁶⁷ sugieren una metodología de modelado basada en conocimiento. El problema debe ser analizado en el momento que cambie la demanda o los tiempos por expertos en programación y con su conocimiento plantear el problema con un procedimiento que proponen los autores por módulos para desarrollar un modelo y algoritmos basados en un algoritmo genético que se ajusten a cada problema específico. La metodología propuesta es para VRP dinámico con ventana de tiempo, y busca cambiar lo menos posible la ruta inicial. Agregar el análisis de expertos al momento de reprogramar las rutas mejora los resultados hasta en un 40%, pues se da un mejor manejo al problema.

⁶⁷ HU, Xiangpei; SUN, Lijun y LIU, Linlin. A PAM approach to handling disruptions in real-time vehicle routing problema. En: Decision support systems. Diciembre, 2012. vol 54, p.1380-1393.

6.2.6 Modelos de programación verdes Debido a los impactos ambientales que tiene el transporte, se agrega un factor ambiental a los modelos de ruteo de la DUM. Ericsson, Larsson y Brundell⁶⁸ fueron de los primeros autores en preocuparse por la emisión de gases contaminantes en la distribución de mercancía, su estudio dirigido a estimar el efecto que herramientas de navegación e información en tiempo real tienen en la reducción de consumo de gasolina, dio pie a múltiples investigaciones en el tema. El estudio compara los resultados de modelos que buscan minimizar tiempo, distancia o combustible y permite ver que el camino más corto no siempre es el que menos combustible consume, y que un modelo con objetivo de minimizar el consumo de combustible puede llegar a ahorrar tiempo en el recorrido.

Ando y Taniguchi⁶⁹ hacen un primer esfuerzo por medir la emisión de gases en el ruteo de vehículos, en un problema con ventanas de tiempo probabilísticas, el modelo se basa en datos históricos de las vías para hallar las probabilidades de la velocidad que se va a presentar en el camino, y partir de estas pronosticar el tiempo que se va a demorar su recorrido. Usa el algoritmo genético para hallar la hora de salida y orden de visitas a los clientes de los vehículos. Aunque en el planteamiento del modelo no tiene en cuenta las emisiones como un factor a disminuir, sí hace un análisis de como las velocidades que llevan los vehículos transportadores impactan en la emisión de gases contaminantes.

Belkas y Laporte⁷⁰ agregan al modelo de ruteo la medición de la emisión de gases contaminantes en las rutas de la distribución de mercancías. El modelo llamado *pollution routing problem* PRP busca disminuir los costos operacionales y la emisión de gases de efecto invernadero. Se escogieron estos dos costos pues son

⁶⁸ ERICSSON, Eva; LARSSON, Hanna y BRUNDELL-FREIJ, Karin. Optimizing route choice for lowest fuel consumption – potential effects of a new driver support tool. En: Transportation research part c. 2006. vol 14, p. 369-383.

⁶⁹ ANDO, Naoki y TANIGUCHI, Eiichi. Travel time reliability in vehicle routing and scheduling with time Windows. En: Networks and spatial economics. 2006. vol 6, p.293-311

⁷⁰ BELKAS, Tolga y LAPORTE, Gilbert. The pollution-routing problem. En: Transportation research part B. 2011. vol 45, p. 1232-1250.

los que mayor impacto tienen al momento de escoger las rutas, los costos de emisión se calculan basados en características del motor del vehículo, uso de aire acondicionado, velocidad (se asume la velocidad a la que pueden andar los vehículos en una vía según regulaciones) peso del vehículo y de la mercancía transportada. Aunque el modelo no es lineal, se usan restricciones que lo convierten en un problema de programación entera lineal, permite ser planteado con ventanas de tiempo o sin estas. La evaluación del modelo permite ver que a veces una menor distancia recorrida implica un mayor consumo de energía.

Ma et al⁷¹ hacen una evaluación para la factibilidad de aplicar modelos de emisión microscópica en diferentes ciudades. El autor hizo la calibración de emisión por vehículo en dos ciudades de China, usando el sistema de medidas de emisión portátiles PEMS, ampliamente usado por la veracidad de la información recolectada. La calibración se realizó para los modelos CMEM, VT-MICRO, EMIT y POLY, los cuales se basan en la capacidad de carga, velocidad del vehículo, motor y modelo del vehículo respectivamente, para calcular la emisión de gases de los vehículos. La calibración de los modelos se hizo con regresiones lineales en MATLAB y una validación con la media cuadrática. La comparación de los resultados de los modelos se realizó con el CMEM, que es el más usado y se concluyó que el VT-micro es el que logra una predicción más acertada, sin embargo aún falta información de ciertos vehículos, especialmente vehículos de gran tamaño, para obtener una predicción más verídica.

Otro modelo de emisión de gases es propuesto por Bing et al⁷², el planteamiento tiene en cuenta costos de mano de obra, distancias y emisión de vehículos. El costo de la emisión se calcula por la velocidad que se espera que tengan los

⁷¹ MA, Xiaoliang, *et al.* An evaluation of microscopic emission models for traffic pollution simulation using on-board measurement. En: Environmental model asses. 2012. vol 17, p. 375-387.

⁷² BING, Xiaoyun, *et al.* Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic waste. En: Waste management. Febrero, 2014. vol 34, p. 719-729.

vehículos en cada segmento y características del vehículo. La solución óptima del problema se halla con programación entera mixta, pero se usan la búsqueda tabú para encontrar una solución factible, con el algoritmo *cross-exchange*. Pruebas del modelo dejan ver una reducción de la emisión de gases contaminantes del 7%.

Bajo un modelo bi-objetivo con soluciones de Pareto y metodología ECM, Demir, Betas y Laporte⁷³ plantean los dos objetivos principales del problema disminuir el consumo de combustible y tiempo manejando, basado en la teoría que a mayor velocidad mayor consumo de gasolina, a pesar que se pueda llegar a más clientes. Para su solución el autor compara la ECM con otras tres metodologías (weight method, weight method with normalization, hybrid ECM & WM) para ver cuál presenta mejor desempeño. Concluyendo que el método híbrido es el que mejor se acopla al modelo.

Además de mejorar las rutas de distribución para disminuir la contaminación generada por el transporte de mercancías, se han hecho otros cambios como la compra de vehículos amigables con el medio ambiente, su adquisición representa una inversión considerable, que no es fácil de hacer, pero necesaria en muchos casos por regulaciones gubernamentales.

Los modelos desarrollados para este tipo de vehículos son pocos, se encuentra el modelo de Cirovic, Pamucar y Bozanic⁷⁴ que programa las rutas para una flota de vehículos mixta (amigables y no amigables con el medio ambiente), que distribuye la carga de la mejor manera, con el objetivo de disminuir la emisión de gases y de ruido, asignando a ambos parámetros una distribución *fuzzy*. Las rutas se encuentran con el algoritmo *Clark Wright*.

⁷³ DEMIR, Emrah; BEKTAS, Tolga y LAPORTE, Gilbert. The bi-objective pollution-routing problema. En: European journal of operational research. Agosto, 2013. vol 232, p. 464-478.

⁷⁴ CIROVIC, Goran; PAMUCAR, Dragan y BOZANIC, Darko. Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. . En: Expert systems with applications. 2014. vol 41, p4245-4258.

Las formas de energía para los vehículos amigables con el medio ambiente no son tan fáciles de conseguir como el combustible, por esto Erdo y Miller⁷⁵ formulan un modelo con programación lineal entera mixta, para generar las rutas de distribución, seleccionando del mejor punto para recargar el vehículo, teniendo en cuenta los recorridos que se deben hacer para recargar estos, minimizando el riesgo de quedarse sin energía. Para su solución el autor propone dos métodos basados en la heurística de ahorros de Clarke y Wright y el algoritmo *Density-Based Clustering*.

⁷⁵ ERDO, Sevgi y MILLER-HOOKS, Elise. A Green vehicle routing problem. En: Transportation research part E: Logistics and transportation review. Enero, 2012. Vol 48, p. 100-114.

7. LATINOAMÉRICA

Se tienen pocas referencias de desarrollo de modelos de optimización de la logística urbana de mercancías en América Latina, un estudio de Withe, Smith y Currie⁷⁶ del uso de la investigación de operaciones en países en desarrollo de Latinoamérica (Argentina, Brasil, Colombia, Chile, México y Uruguay) deja ver el poco incentivo que se da en las universidades para usar la investigación de operaciones como una herramienta para solucionar problemas. La mayoría de modelos de optimización usados en estos países son adaptaciones de modelos creados por países desarrollados, y se enfocan en la solución de problemas relacionados con las metas del milenio (erradicar la pobreza y el cuidado de la salud).

Hidalgo y Huizenga⁷⁷ dicen que las principales ciudades latinoamericanas tienen características similares referentes al transporte de mercancías, pero presentan variaciones en su cantidad de habitantes. Entre sus similitudes está el poco uso de energías renovables, la falta de infraestructura para el transporte de mercancías y la desconexión entre políticas de regulación de transporte con el crecimiento económico de las ciudades.

Un factor que ha dificultado la creación de modelos de optimización de la logística urbana de mercancías en América Latina según Figueroa⁷⁸ es la desorganización en el transporte de mercancías, generada por un enfoque en actividades comerciales y un descuido en los servicios del transporte en la década de los 90, periodo durante el cual se tenían exigencias flexibles para la DUM, permitiendo un

⁷⁶ WHITE, Leroy, SMITH, Honora y CURRIE, Christine. OR in developing countries: A review. En: European journal of operational research. Febrero, 2010. vol. 208, p. 1-11.

⁷⁷ HIDALGO, Dario y HUIZENGA, Cornie. Implementation of sustainable urban transport in Latin America. En: Research in transportation economics. Julio, 2012. vol 40, p. 66-77.

⁷⁸ FIGUEROA, Oscar. Transporte urbano y globalización. Políticas y efectos en América Latina. En: Revista EURE. Diciembre, 2005. vol XXXI, no 94, p. 41-53.

parque automotriz con vehículos pocos adaptados y en general una desarticulación del servicio de transporte tanto de mercancías como de personas.

Los siguientes son los modelos o estudios que se encontraron que han sido desarrollados por autores latinoamericanos o en ciudades latinoamericanas relacionados con la logística urbana de mercancías.

7.1 BRASIL

En Rio de Janeiro el problema de localización de terminales de carga para el transporte de mercancía ha sido tratado por Portugal. Morgado y Lima⁷⁹, con una metodología similar a la propuesta por Tsamboulas, Vrenken y Lekka⁸⁰. La metodología de toma de decisiones está basada en un proceso analítico jerárquico (AHP), que busca seleccionar una locación que garantice la accesibilidad y promueva el uso de transporte intermodal, teniendo en cuenta que se tiene información restringida y poco fiable sobre el transporte de mercancías de la ciudad

Giavina-Bianchi y Cavalieri⁸¹ afirman que la localización de estas bodegas en Brasil está a cargo de cada transportador, por lo que Portugal incorpora al actor público en la metodología de toma de decisión, para que se logre el bien de la comunidad, ciudad y país, con un proceso que tenga la percepción de cada actor involucrado.

⁷⁹ PORTUGAL, Lincio da Silva, MORGADO, Andréa y LIMA, Orlando. Location of cargo terminals in metropolitan areas of developing countries: the Brazilian case. En: Journal of transport geography. Julio 2011. vol. 19, no. 4, p. 900-910.

⁸⁰ TSAMBOULAS, Dimitri, VRENKEN, Huub y LEKKA, Anna-Maria. Assessment of a transport policy potential for intermodal mode shift on a European scale. En: Transportation research part A. Octubre, 2007. vol. 41, no. 8, p. 715–733.

⁸¹ GIAVINA-BIANCHI, M.A Y CAVALIERI, N. Key Points For Freight Logistics industry. 2004. Departamento de Infra-estrutura Industrial, Federação e Centro das Indústrias do Estado de São Paulo.

Otro estudio realizado en la ciudad de Rio de Janeiro elaborado por Maire y Basto⁸², hace una evaluación financiera a un proyecto de la recolección de residuos y bienes que ya no se usan (considerado problema de la logística inversa de la DUM) como materia prima para la creación de energía eléctrica. La metodología que tiene en cuenta la legislación de la recolección de residuos sólidos en la ciudad, además de medir el beneficio económico del proyecto, estima la disminución de gases contaminantes que se daría, e impactos positivos en el medio ambiente y calidad de vida de los habitantes.

Por otro lado Timms⁸³ hace un estudio de transferibilidad de medidas de planeación de transporte de mercancías en la ciudad de Cariacica. La investigación hace parte del proyecto TURBLOG⁸⁴, impulsado por la unión europea para estudiar la transferibilidad de medidas para la planeación de transporte entre ciudades, aunque el proyecto tiene en cuenta otras ciudades latinoamericanas como Lima y Belo Horizonte, el estudio de Cariacica es el único que trabaja una metodología que requiere poca información y está diseñada para administraciones que tienen una financiación limitada para el manejo del transporte de mercancías, además Cariacica presenta características comunes de ciudades pequeñas latinoamericanas, a las que les falta regulación, planeación e infraestructura para la DUM. Aunque ningún estudio del proyecto fue implementado, todos generan ideas iniciales para la creación de medidas para el transporte de mercancías.

⁸² MAIER, Sebastian y BASTO, Luciano. Economic feasibility of energy recovery from solid waste in the light of Brazil's waste policy: The case of Rio de Janeiro. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Octubre, 2014. vol 35, p. 484-498.

⁸³ TIMMS, Paul. Transferability of urban freight transport measures: A case study of Cariacica (Brazil). En: Research in Transportation Business & Management. Febrero, 2014. vol. 11, p. 63-74.

⁸⁴ TURBLOG. Transferability of urban logistics concepts and practices from a worldwide perspective. Deliverable 4: "Transferability guidelines and evaluation". 2011.

Oliveira y Dias⁸⁵ aplican la metodología de diagnóstico de problemas de distribución de mercancías, propuesta por Tedesco y Yamashita⁸⁶, en la ciudad de Belo Horizonte. La metodología analiza las características de vehículos, la mercancía y actividades en su entrega, ruta de vehículos y comportamiento de actores involucrados. Para el caso de Belo Horizonte se encontró el principal problema en su proceso de entrega, pues la ciudad cuenta con pocas zonas de carga y descarga y estas no tienen la regulación necesaria, por lo que son comúnmente usadas por vehículos particulares, lo que aumenta el tráfico y los tiempos de entrega y recolección de mercancía, y en general de la ruta de los vehículos. Dablanc⁸⁷ afirma que esta falta de regulación es un problema que afecta a varias ciudades latinoamericanas.

Un autor Brasileño con múltiples artículos que tratan el problema de la logística urbana es Denis Borenstein. Junto con Li y Mirchandani⁸⁸ han realizado una revisión de la literatura de métodos y algoritmos para la reprogramación de vehículos (VRSP) cuando un vehículo se avería durante la distribución de la mercancía, luego con Vicentini⁸⁹ hizo una revisión de la literatura similar, pero esta vez con el problema de reprogramación en tiempo real, el artículo tiene en cuenta los modelos desarrollados para solucionar este problema no solo en la distribución de vehículos sino además de trenes y aviones.

⁸⁵ OLIVEIRA, Leise Kelly y DIAS, Emilia. A Diagnosis Methodology for Urban Goods Distribution: A Case Study in Belo Horizonte City (Brazil). En: Procedia Social and Behavioral Sciences. 2014. vol. 125, p. 199-211.

⁸⁶ TEDESCO, Giovanna Megumi Ishida y YAMASHITA, Yaeko. A methodology for the diagnosis of a transport system. XXII ANPET. Fortaleza. 3-7 novembro 2008.

⁸⁷ DABLANC, Laetitia. (2009). Freight transport for development toolkit: urban freight. Transport Research Support. World Bank. P 13-17.

⁸⁸ LI, Jing-Quan, MIRCHANDANI, Pitu y BORENSTEIN, Denis. The vehicle rescheduling problem: Model and algorithms. En: Networks. 2007. vol. 50, no 3, p. 211–229.

⁸⁹ VICENTINI, Monize, *et al.* Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services. En: Journal of Scheduling. 2013. vol. 8, p. 1-27.

Estas revisiones fueron útiles para que luego Borestein, Li y Mirchandani^{90 91}⁹² desarrollaran un sistema para la toma de decisiones para la reprogramación en tiempo real de vehículos cuando hay un accidente, un algoritmo que se ayuda de una simulación en computador y una heurística para solucionar el mismo problema. Las tres propuestas fueron desarrolladas para disminuir el tiempo y costo generado por estos retrasos en las rutas de distribución.

El sistema para la toma de decisiones propuesto por Boerestein, Li y Mirchandani⁹³ fue aplicado en Porto alegre, para la reprogramación de vehículos en la recolección de residuos sólidos en la ciudad. La metodología modela el problema con programación lineal entera mixta y usa el método CPLEX para su solución, selecciona el mejor vehículo para hacer el reemplazo, su ruta y capacidad.

Otro modelo para la recolección de residuos sólidos aplicado a ciudades brasileras es el presentado por Pureza, Morabito y Reimann⁹⁴, pero esta vez con un modelo que pretende minimizar el tiempo empleado en la recolección, aumentando la fuerza laboral del recorrido, dando solución al problema de VRPTW. Los autores proponen dos heurísticas basadas en la búsqueda tabú y la colonización de hormigas (ACO), para hallar las rutas y carga laboral óptima.

⁹⁰ BORENSTEIN, Denis, LI, Jing- Quan y MIRCHANDANI, Pitu. A decision support system for the single-depot vehicle rescheduling problem. En: Computers & Operations Research. 2007. vol. 34, no 4, p. 1008–1032.

⁹¹ BORENSTEIN, Denis, LI, Jing- Quan y MIRCHANDANI, Pitu. Parallel auction algorithm for bus rescheduling. En: Economics and mathematical systems. 2008. vol 600, p. 281-299.

⁹² BORENSTEIN, Denis, LI, Jing- Quan y MIRCHANDANI, Pitu. A Lagrangian heuristic for the real-time vehicle rescheduling problem. En: Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review. vol. 45, no.3, p 419–433.

⁹³ BORENSTEIN, Denis, LI, Jing- Quan y MIRCHANDANI, Pitu. Truck schedule recovery for solid waste collection in Porto Alegre. En: International Transactions in Operational Research. 2008. vol. 15, p. 565–582.

⁹⁴ PUREZZA, Vitoria, MORABITO, Reinaldo y REINMANN, Marc. Vehicle routing with multiple deliverymen: Modeling and heuristic approaches for the VRPTW. En: European Journal of Operational Research. Diciembre, 2011. vol 218, p. 636.647.

7.2 MÉXICO

Los estudios enfocados al análisis de la distribución de mercancías en México se centran en su capital Ciudad de México. Schteingart⁹⁵ hace una descripción del problema ambiental en esta ciudad, que es de las metrópolis más pobladas del mundo, su crecimiento poblacional exponencial mezclado con una falta de legislación en el uso de tierras ha hecho que se presente una aglomeración que trae consigo problemas de tráfico y contaminación. La mayoría del tráfico de la ciudad es generado por vehículos particulares, por lo que el primer problema a solucionar por la administración pública es lograr un sistema de transporte público que vaya de acuerdo a las necesidades de la ciudad.

Uno de los estudios realizado en la Ciudad de Mexico por Lozano et al⁹⁶ hace un análisis de los accidentes en el transporte de materiales tóxicos en áreas urbanas. El estudio resulta de interés porque se han presentado 6 accidentes de este tipo de mercancía en la ciudad, y debido a que la zona industrial se encuentra en la misma área de vivienda, muchas personas son expuestas a la toxicidad que genera estos accidentes. El análisis se basa en la metodología de Bernatik et al⁹⁷ para medir la dispersión de gases y niveles de toxicidad, la de Ronza et al⁹⁸ para estimar los costos por daños a personas, equipos y el medio ambiente y propone una metodología de asignación de tráfico a arcos para determinar la cantidad de personas afectadas por el accidente.

⁹⁵ SCHTEINGART, Martha. The environmental problems associated with urban development in Mexico City. En: Environment and urbanization. Abril, 1989. vol. 1, no. 1, p 40-50.

⁹⁶ LOZANO, Angelica, *et al.* Analysis of hazmat transportation accidents in congested urban areas, based on actual accidents in Mexico. En: Procedia Social and Behavioral Sciences. 2010. Vol 2, p. 6053–6064.

⁹⁷ BERNATIK, A, *et al.* Modelling accidental releases of dangerous gases into lower troposphere from mobile sources. En: Process Safety and Environment Protection. Mayo, 2008. Vol. 86, p. 198-207.

⁹⁸ RONZA, Andrea, *et al.* (2009). Economic valuation of damages originated by major accidents in port areas. En: Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Septiembre, 2009. vol. 22, p. 474–483.

Otro estudio también realizado por Lozano et al⁹⁹ para la Ciudad de México hace un análisis del impacto ambiental de políticas de transporte de mercancías. Los autores realizan un análisis macroscópico del flujo de vehículos y emisiones en hora pico, estudiando los cambios que trae la medida específica de la prohibición de vehículos de tamaño mediano o grande en ciertas calles principales de la ciudad. El análisis del tráfico modelado con matices O-D según el flujo y velocidad en ciertos *arcs* en hora pico, permite ver que la medida no tiene mayor impacto en el tráfico ni los niveles de emisión, y sí aumenta hasta en un 9% el tiempo de recorrido de los vehículos.

Este estudio es el único realizado para medir el impacto de políticas en el tráfico y medio ambiente en Latinoamérica, hay estudios similares como el de Nakamura et al¹⁰⁰ que mide el impacto ambiental de una restricción semejante a la de Ciudad de México pero en la ciudad de Osaka (Japón) y el de Quak y Koster¹⁰¹ que mide el impacto en costos y medio ambiente que tiene la restricción horaria para la distribución de mercancía en Holanda. Quak y Koster¹⁰² afirman la necesidad de más estudios de este tipo a nivel mundial, pues solo así se sabrá si una política sí tiene el impacto esperado en una ciudad o por lo contrario va a traer consecuencias negativas.

Otros trabajos que ha realizado Lozano en la Ciudad de México con Antún y Casanova¹⁰³ son una metodología para la predicción de demanda de transporte

⁹⁹ LOZANO, Angelica, *et al.* Impact of the recent environmental policies on the freight transportation in Mexico City. En: *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 2012. vol. 39, p. 437-449.

¹⁰⁰ NAKAMURA, Y, *et al.* A macroscopic traffic simulator for evaluating urban transport measures for heavy vehicles. En: *Innovations in city logistics*. 2008, p. 185-196.

¹⁰¹ QUAK, Hans y KOSTER, Rene. Delivering goods in urban areas: How to deal with urban policy restrictions and the environment. En: *Transportation Science*. 2009. vol. 43, no. 2, p. 211 - 227.

¹⁰² QUAK, Hans y KOSTER, Rene. The impacts of time access restrictions and vehicle weight restrictions on food retailers and the environment. En: *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2006. vol 6, no. 2, p.131-150.

¹⁰³ ANTÚN, J.P.; CASANOVA, R. Y LOZANO, Angelica. Gestión de la demanda de transporte de carga urbana: Proyecto de Microplataforma Logística urbana en el Centro Histórico de la Ciudad de México para la industria de la confección textil. Memorias del XII Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano (CLATPU). Octubre 23-27, Bogotá, Colombia. 2003

de la industria de confección textil, prediciendo los viajes que esta generará en el centro histórico de la ciudad, con Hernandez y Alarcón¹⁰⁴ un estudio de las tendencias de distribución de mercancías en la ciudad y con Antún¹⁰⁵ una estrategia para el desarrollo y localización de centros logísticos identificando sectores relevantes que faciliten la ejecución de las actividades logísticas.

Querétaro es otra ciudad mexicana que llama la atención para el estudio de DUM, que se caracteriza por su competitividad en el manejo del transporte de mercancías. Betanzo¹⁰⁶ presenta una metodología de tres fases para el estudio del transporte urbano de la ciudad, la primera fase hace un diagnóstico de la situación actual de la DUM basado en los estudios previamente realizados en con Romero¹⁰⁷ y Sánchez¹⁰⁸, que analizan el transporte urbano de carga en Querétaro, Toral¹⁰⁹ que hace una predicción de movimientos de carga y Zabala¹¹⁰ que estudia la infraestructura disponible en la ciudad.

La segunda fase investiga modelos internacionales que se puedan aplicar y determina una herramienta de medición de las políticas que se vayan a implementar, y la tercera fase define las acciones a implementar a corto, mediano

¹⁰⁴ LOZANO, Angelica, *et al.* New trends on physical distribution logistics in Mexico city Metropolitan Area. En: Planning on-street loading-unloading spaces considering the behavior pickup-delivery vehicles and parking enforcement. The Fifth International Conference on City Logistics, Crete Island, Greece, Julio 11-13 2007.

¹⁰⁵ ANTÚN, J.P, *et al.* Estrategia para el desarrollo de centro logísticos en el área metropolitana de la ciudad de México. En: Primer Congreso de Logística y Gestión de la Cadena de Suministro. Zaragoza, Septiembre 12 y 13, 2007.

¹⁰⁶ BETANZO, Eduardo. Una aproximación metodológica al estudio integrado del transporte urbano de carga: el caso de la Zona Metropolitana de Querétaro en México. En: Revista latinoamericana de estudios urbano regionales. Septiembre, 2011. vol. 37, no. 112, p. 63-87.

¹⁰⁷ BETANZO E. Y ROMERO J.A. Transporte urbano de carga sustentable en Querétaro (México). En: XV Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano (CLATPU). Argentina, Marzo 1-3, 2009.

¹⁰⁸ BETANZO, E.; ROMERO, J.A. Y SANCHEZ, I. 2007. Caracterización del Transporte Urbano de Carga en Querétaro, México. En: Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano (CLATPU). Río de Janeiro, Noviembre 18-23, 2007.

¹⁰⁹ BETANZO, E. Y TORAL, M. Análisis de Generadores de movimientos de carga en la Zona Metropolitana de Querétaro (México). En: Memorias del VII Congreso de Ingeniería de Transporte. Ciudad Real, Junio 14-16, 2006.

¹¹⁰ BETANZO, E. & ZABALA, R. El mantenimiento de pavimentos en vialidades urbanas: El caso de la Zona Metropolitana de Querétaro (México). En: Revista Ingeniería. 2008. Vol. 12, No. 2, p. 67-75.

y largo plazo teniendo en cuenta la planeación de transporte para la ciudad realizada por Betanzo¹¹¹.

Años después Betanzo et al¹¹² proponen otra metodología de evaluación para el transporte urbano, esta vez con una herramienta más elaborada que permite el planteamiento matemático del problema y su sistematización. Otra evaluación sugerida para ciudades mexicanas es realizada por Camacho y Flamand¹¹³, pero esta vez para medir el impacto de políticas ambientales en general, que de cierta manera afectan la DUM.

7.3 OTROS

El estudio de la distribución urbana de mercancías en otros países latinoamericanos es poco, solo se encuentran documentos que recopilan las políticas para el transporte urbano de mercancías como el de Díaz, Galetovic y Sanhueza¹¹⁴, que hace un análisis de las restricciones establecidas en el Plan de transporte urbano para la ciudad de Santiago de Chile. El autor presenta una caracterización de la economía, transporte de carga, Instituciones de regulación, normas vigentes y planes que afectan la DUM en la ciudad. El consejo de transporte de Lima y Callao¹¹⁵ también hace un diagnóstico integral del servicio de carga en la ciudad de Lima, con el fin de brindar una herramienta útil para la

¹¹¹ BETANZO, E. Propuesta de un modelo de desarrollo del transporte urbano de carga en Querétaro. En: Informe de Investigación. 2007. Vol. I, p. 1-125.

¹¹² BETANZO, Eduardo, *et al.* Un referencial para evaluar la gestión pública en transporte urbano de carga. En: Gestión y Política Pública. 2013. vol. 22, p.313-354.

¹¹³ CAMACHO, Maria Ofelia y FLAMAND, Laura. Políticas intergubernamentales para controlar la contaminación del aire en ciudades mexicanas Una evaluación. En: Gestión y política pública. 2008. vol 17, no. 2, p. 261-313.

¹¹⁴ DIAZ, Carlos, GALETOVIC, Alexander y SANHUEZA, Ricardo. La regulación del transporte de carga en Santiago: Características, evaluación y propuestas. En: Cuadernos de economía. Enero, 2004. vol. 40, no. 119, p. 5-46.

¹¹⁵ CONCEJO DE TRANSPORTE DE LIMA Y CALLAO. Transporte de carga en el área metropolitana de Lima y Callao. 2007.

planeación de la DUM. El análisis tiene en cuenta el punto de vista del sector público y privado acerca del problema de transporte.

En Colombia, revistas científicas como Revista de ingeniería de la universidad de los andes, se interesan más por el estudio del transporte de personas, sin embargo hay estudios relacionados con la DUM, como el realizado por Caicedo¹¹⁶ que resalta la falta de planeación en infraestructura para el transporte de mercancías con cambios que se presentan en el país como los dados por el TLC, Serrano¹¹⁷ propone alternativas para la financiación de proyectos de infraestructura para el transporte con participación del sector privado.

También se encuentran estudios de medición de emisión de gases contaminantes como el realizado por Rodriguez y Behrentz¹¹⁸ para la ciudad de Bogotá, Londoño, Correa y Palacio¹¹⁹ para la ciudad de Envigado y Arango¹²⁰ para conocer el estado actual de los combustibles usados en Colombia. Cabe destacar que ninguno de estos tres estudios hace un análisis específico de la emisión generada por la DUM, sino hace mediciones de la contaminación causada por todos los tipos de vehículos presentes en las ciudades.

Finalmente Kelley, Kuby y Sierra¹²¹ proponen un caso especial para el transporte de bienes en comunidades indígenas en Ecuador, los autores diseñan una red de transporte modelada con programación lineal entera mixta y encuentra valores

¹¹⁶ CAICEDO, Juan Martin. Retos de la globalización y del TLC sobre la infraestructura de transporte. En: Revista de ingeniería. 2006. No 24, p. 106-108.

¹¹⁷ SERRANO, Javier. Financiamiento de infraestructura de transporte. En: Revista de ingeniería. 2010. No 32, p. 108-116.

¹¹⁸ RODRIGUEZ, P.A y BEHRENTZ, E. Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas. En: Revista de ingeniería. 2009. No 31, p. 14-31.

¹¹⁹ LONDOÑO, James, CORREA, Mauricio Andres y PALACIO, Carlos Alberto. Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. En: Revista EIA. 2011.

¹²⁰ ARANGO, Jorge Humberto. Calidad de los combustibles en Colombia. En: Revista de ingeniería. 2009. No. 29, p. 100-108.

¹²¹ KELLEY, Jason; KUBY, Michael y SIERRA, Rodrigo. Transportation network optimization for the movement of indigenous goods in Amazonian Ecuador. En: Journal of Transport Geography. 2013. vol 28, p. 89-100.

óptimos para la localización de bases, paradas, rutas y volúmenes a transportar. El modelo puede ser aplicado para impulsar la economía de diferentes regiones apartadas en Latinoamérica.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Según la investigación realizada se construye una tabla que resume los problemas de la logística urbana que se trabajan con modelos matemáticos, con sus respectivos objetivos, variables usadas y autores. (Ver Anexo B).
- De los artículos analizados para el estado del arte se puede observar en el ANEXO C que la mayoría de modelos de optimización trabajados para solucionar el problema de la logística urbana de mercancías son modelos de ruteo de vehículos VRP. Si bien ya hay varios modelos de estos que incorporan las políticas que afectan la distribución de mercancías, como modelos VRPTW para el cumplimiento de horas valle, aún falta desarrollar modelos VRP que tengan en cuenta cambios que se han presentado en la distribución urbana de mercancías, especialmente generados por el cuidado ambiental, como la adquisición de vehículos amigables con el medio ambiente.
- Del ANEXO C se observa el incremento de publicaciones relacionadas con la logística urbana a partir del 2011. La mayoría de estos son modelos dinámicos que incorporan en las tecnologías de la información como herramienta para tener datos acertados en tiempo real, lo que da mejores resultados en las rutas de distribución, se puede ver a China como líder de este tipo de modelos. Otro factor que se ha tenido en cuenta en los últimos años (2013-2014) debido a los altos índices de contaminación que genera el transporte de mercancías, es el factor ambiental, por lo general se agrega como un costo de penalización por emisión de ruido, gases o consumo de gasolina.
- Se observa que el problema de localización de facilidades logísticas ha ido evolucionando según los problemas de la DUM, pues inicialmente su objetivo era la minimización de costos, después tiene en cuenta cómo el lugar elegido

repercute en el tráfico de la zona y recientemente integran el impacto ambiental que tienen en la zona de localización.

- Debido al reciente uso incremental de vehículos amigables con el medio ambiente para la distribución urbana de mercancía, existe la necesidad de modelos de optimización para la localización de lugares para recargar o suministrar el combustible necesario para estos vehículos.
- La predicción de la demanda de la DUM es un valor muy importante para la creación de políticas e infraestructura, debido a las diferentes características de cada ciudad es difícil aplicar o plantear un modelo que sirva para la predicción de la demanda de manera adecuada, por lo que comúnmente se usan metodologías y no modelos para calcular este valor. Italia resalta por ser el país líder en publicaciones que estudian la predicción de demanda de la DUM.
- Los modelos VRP son los más estudiados en la logística urbana de mercancías porque en su planteamiento pueden tratar diferentes problemas de la DUM como la asignación de mercancía y carga laboral a los vehículos, horas para realizar las rutas, cantidad de vehículos necesarios para la distribución, accidentes y congestión con el fin de disminuir costos, tiempo de recorrido, tráfico, emisiones o aumentar la satisfacción de la demanda.
- Del ANEXO C se observa que la mayoría de métodos de solución desarrollados para los modelos de optimización son metaheurísticas, este método es ampliamente empleado pues encuentra soluciones de alta calidad, que aunque no garantizan un resultado óptimo, son más factibles. Además estos métodos son flexibles, por lo que permiten ser adaptados para cada problema, usando información disponible y el análisis del modelo según la situación de cada ciudad en logística urbana de mercancías.

- En el caso Latinoamericano se observa una brecha en modelos de optimización de la logística urbana de mercancías, la mayoría de estudios realizados para la región son recopilaciones de las políticas que afectan el transporte de mercancías y análisis para medir la efectividad de estas políticas.
- La falta de control y planeación de la DUM en Latinoamérica demanda el estudio de metodologías para creación de políticas que regulen el transporte de mercancías para dar una organización a la logística urbana en estos países.
- Para el caso de Colombia, aún hace falta gran inversión en infraestructura y tecnologías de información para organizar la distribución urbana de mercancías, por lo que se sugiere profundizar el desarrollo de modelos de inversión para la infraestructura de la logística urbana.

BIBLIOGRAFIA

AIZED, Tauseef y SRAI, Jagjit. Hierarchical modelling of last mile logistic distribution system. En: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. vol 70, p. 1053-1061.

ALUMUR, Sibel y KARA, Bahar. Network hub location problem: the state of the art. En: European journal of operational research. 2008. Vol 190, p. 1-21.

AMBROSINI, Christian, et al. Urban freight establishment and tour based surveys for policy oriented modeling. En: Procedia social and behavioral sciences. 2012, vol. 2. P 6013-6026.

ANAND, Nilesh, et al. GenCLON: an ontology for city logistics. En: Expert systems with applications. 2012. vol 39, p. 11944-11960.

ANAND, Nilesh, et al. City logistics modeling efforts: trends and gaps – a review. En: Procedia social and behavioral sciences. 2012, vol. 39. P 101-115.

ANDERSON, Stephen, et al. Urban logistics—how can it meet policy makers sustainability objectives?. En: journal transport of geology. 2005, vol. 13. P 71-81.

ANDO, Naoki y TANIGUCHI, Eiichi. Travel time reliability in vehicle routing and scheduling with time Windows. En: Networks and spatial economics. 2006. vol 6, p.293-311.

ANTÚN, J.P.; CASANOVA, R. Y LOZANO, Angelica. Gestión de la demanda de transporte de carga urbana: Proyecto de Microplataforma Logística urbana en el Centro Histórico de la Ciudad de México para la industria de la confección textil. Memorias del XII Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano (CLATPU). Octubre 23-27, Bogotá, Colombia. 2003

ANTÚN, J.P, et al. Estrategia para el desarrollo de centro logísticos en el área metropolitana de la ciudad de México. En: Primer Congreso de Logística y Gestión de la Cadena de Suministro. Zaragoza, Septiembre 12 y 13, 2007.

ARAS, Necati; AKSEN, Deniz Y TEKIN, Mehmet. Selective multi-depot vehicle routing problem with pricing. En: Transportation research part C. Agosto, 2010. vol 19, no 5, p. 866-884.

ARANGO, Jorge Humberto. Calidad de los combustibles en Colombia. En: Revista de ingeniería. 2009. No. 29, p. 100-108

AWASTHI, Anjali; CHAUAN, Ss y GOYAL, Sk. A multicriteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. En: Mathematical and computer modeling. Julio, 2010. vol 53, p. 98-109.

BETANCOUR, Osbel. Logística. Conceptualización y tendencias actuales. Universidad central de las villas.

BEHRENS, Kristian y PICARD, Pierre. Transportation, freight rates, and economic geography. En: Journal of International Economics. Junio, 2011. vol 85, p. 280-291.

BELKAS, Tolga y LAPORTE, Gilbert. The pollution-routing problem. En: Transportation research part B. 2011. vol 45, p. 1232-1250.

BERNATIK, A, et al. Modelling accidental releases of dangerous gases into lower troposphere from mobile sources. En: Process Safety and Environment Protection. Mayo, 2008. Vol. 86, p. 198-207.

BETANZO, E. & ZABALA, R. El mantenimiento de pavimentos en vialidades urbanas: El caso de la Zona Metropolitana de Querétaro (México). En: Revista Ingeniería. 2008. Vol. 12, No. 2, p. 67-75.

BETANZO, E. Propuesta de un modelo de desarrollo del transporte urbano de carga en Querétaro. En: Informe de Investigación. 2007. Vol. I, p. 1-125.

BETANZO, Eduardo, et al. Un referencial para evaluar la gestión pública en transporte urbano de carga. En: Gestión y Política Pública. 2013. vol. 22, p.313-354.

BETANZO, Eduardo. Una aproximación metodológica al estudio integrado del transporte urbano de carga: el caso de la Zona Metropolitana de Querétaro en México. En: Revista latinoamericana de estudios urbano regionales. Septiembre, 2011. vol. 37, no. 112, p. 63-87.

BETANZO E. Y ROMERO J.A. Transporte urbano de carga sustentable en Querétaro (México). En: XV Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano (CLATPU). Argentina, Marzo 1-3, 2009.

BETANZO, E.; ROMERO, J.A. Y SANCHEZ, I. 2007. Caracterización del Transporte Urbano de Carga en Querétaro, México. En: Memorias del XIV Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano (CLATPU). Río de Janeiro, Noviembre 18-23, 2007.

BETANZO, E. Y TORAL, M. Análisis de Generadores de movimientos de carga en la Zona Metropolitana de Querétaro (México). En: Memorias del VII Congreso de Ingeniería de Transporte. Ciudad Real, Junio 14-16, 2006.

BING, Xiaoyun, et al. Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic waste. En: Waste management. Febrero, 2014. vol 34, p. 719-729.

BOONPRASURT, Prachya y NANTHAVANIJ, Suebsak. Optimal fleet size, delivery routes and workforce assignments for the vehicle routing problem with manual materials handling. En: International Journal of Industrial Engineering. 2012. vol 19, p. 252-263.

BORENSTEIN, Denis, LI, Jing- Quan y MIRCHANDANI, Pitu. A decision support system for the single-depot vehicle rescheduling problem. En: Computers & Operations Research. 2007. vol. 34, no 4, p. 1008–1032.

BORENSTEIN, Denis, LI, Jing- Quan y MIRCHANDANI, Pitu. Parallel auction algorithm for bus rescheduling. En: Economics and mathematical systems. 2008. vol 600, p. 281-299.

BORENSTEIN, Denis, LI, Jing- Quan y MIRCHANDANI, Pitu. A Lagrangian heuristic for the real-time vehicle rescheduling problem. En: Transportation Research Part E: Logistics and transportation Review. vol. 45, no.3, p 419–433.

BORENSTEIN, Denis, LI, Jing- Quan y MIRCHANDANI, Pitu. Truck schedule recovery for solid waste collection in Porto Alegre. En: International Transactions in Operational Research. 2008. vol. 15, p. 565–582

BRAUERS, Willem Karel, et al. Multi objective decision making for road design. En: Transport. Junio, 2008. vol 23, no 3, p. 183-193.

CAICEDO, Juan Martin. Retos de la globalización y del TLC sobre la infraestructura de transporte. En: Revista de ingeniería. 2006. No 24, p. 106-108.

CAMACHO, Maria Ofelia y FLAMAND, Laura. Políticas intergubernamentales para controlar la contaminación del aire en ciudades mexicanas Una evaluación. En: Gestión y política pública. 2008. vol 17, no. 2, p. 261-313.

CANHONG, Lin; et al. Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends. En: Expert systems with applications. 2014. Vol 41, p. 1118-1138.

CARRASCO, Javier. Evolución de los enfoques y conceptos de la logística su impacto en la dirección y gestión de las organizaciones. Universidad politécnica de Madrid.

CHEN, Si, et al. Arc-routing models for small package local routing. En: Transportation science. Febrero, 2009. vol 43, no. 1, p. 43-55.

CHERRETT, Tom, et al. Understanding urban freight activity – key issues for freight planning. En: journal transport of geology. 2012 vol. 24. P 22-32.

CIROVIC, Goran; PAMUCAR, Dragan y BOZANIC, Darko. Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. . En: Expert systems with applications. 2014. vol 41, p4245-4258.

COMI, Antonio y ROSATI, Luca. CLASS: a city logistics analysis and simulation support system. En: Procedia social and behavioral sciences. 2013, vol 87. P 321-337.

CONCEJO DE TRANSPORTE DE LIMA Y CALLAO. Transporte de carga en el área metropolitana de Lima y Callao. 2007.

CRAINIC, Gabriel, et al. Advanced freight transportation systems for congested urban areas. En: transportatios research part c. 2004. Vol 12. P119-137.

CRAINIC, Teodor y LAPORTE, Gilbert. Planning models for freight transportation. En: European journal of operational research. 1997 vol. 97. P 409-438.

DABLANC, Laetitia. (2009). Freight transport for development toolkit: urban freight. Transport Research Support. World Bank. P 13-17.

DANTZIG, G., y RAMSER, J. The truck dispatching problem. En: Management Science. 1959, vol. 6, p. 80–91.

DEMIR, Emrah; BEKTAS, Tolga y LAPORTE Gilbert. A review of recent research on Green road freight transportation. En: European journal of operational research. Enero, 2014. no 237, p. 775-793.

DEMIR, Emrah; BEKTAS, Tolga y LAPORTE, Gilbert. The bi-objective pollution-routing problema. En: European journal of operational research. Agosto, 2013. vol 232, p. 464-478.

DIAZ, Carlos, GALETOVIC, Alexander y SANHUEZA, Ricardo. La regulación del transporte de carga en Santiago: Características, evaluación y propuestas. En: Cuadernos de economía. Enero, 2004. vol. 40, no. 119, p. 5-46

ERDO, Sevgi y MILLER-HOOKS, Elise. A Green vehicle routing problem. En: Transportation research part E: Logistics and transportation review. Enero, 2012. Vol 48, p. 100-114.

ERICSSON, Eva; LARSSON, Hanna y BRUNDELL-FREIJ, Karin. Optimizing route choice for lowest fuel consumption – potential effects of a new driver support tool. En: Transportation research part c. 2006. vol 14, p. 369-383.

FIGUEROA, Oscar. Transporte urbano y globalización. Políticas y efectos en América Latina. En: Revista EURE. Diciembre, 2005. vol XXXI, no 94, p. 41-53.

FILIPPI, Francesco. Ex – ante assessments of urban freight transport policies. En: Procedia social and behavioral sciences. 2012, vol 2. P 6332-6342.

GALLO, Nancy. Taller: diseño del estado del arte en ciencias de la salud, humanas y sociales. Universidad de Antioquia.

GENTILE, Guido y VIGO, Daniele. Movement generation and trip distribution for freight demand modelling applied to city logistic. En: European transport. 2013. vol 54, no 6, p. 52-79

GHANNADPOUR, Seyed; NOORI, Siamak y TAVAKKOLI-MOGHADDAM, Reza. Multiobjective dynamic vehicle routing problema with fuzzy travel times and customers satisfaction in supply chain management. En: Transactions on engineering management. Noviembre, 2013. vol 60, no 4, p. 777-790.

GIAVINA-BIANCHI, M.A Y CAVALIERI, N. Key Points For Freight Logistics industry. 2004. Departamento de Infra-estrutura Industrial, Federação e Centro das Indústrias do Estado de São Paulo.

GIRIDHAR, Arvind y KRUMAR, P. R. Scheduling Automated Traffic on a Network of Roads. En: IEEE transactions on vehicular technology. Septiembre, 2006. vol 55, no 5, p. 1467- 1474.

GONZALEZ-FELIU, Jesus, et al. A simulation framework for evaluating the impacts of urban goods transport in terms of road occupancy. En: journal of computational science. Abril, 2012. Vol 3. P 206-215.

GONZALES- FELIU, Jesus y ROUTHIER, Jean-Louis. Modeling urban goods movement: How to be oriented with so many approaches?. En: Procedia social and behavioral sciences. 2012, vol. 39. P 89-100.

GRIBKOVSKAIA, Irina; LAPORTE, Gilbert y SHYSHOU, Aliaksaridr. The single vehicle routing problema with deliveries and selective pickups. En: Computers & operations research. Septiembre, 2008. vol 35, no. 9, p. 2908–2924.

HIDALGO, Dario y HUIZENGA, Cornie. Implementation of sustainable urban transport in Latin America. En: Research in transportation economics. Julio, 2012. vol 40, p. 66-77.

HOLGUIN-VERAS, Jose y THORSON, Ellen. Trip Length Distributions in Commodity-Based and Trip-Based Freight Demand Modeling: Investigation of Relationships. En: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. Enero, 2007. no 00-0910, p. 37-48.

HSU, Li-fu; HSU, Chiun-Chie y LIN, Tsai-Duan. An intelligent artificial system: artificial immune based hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problema. En: applied mathematics & information sciences. Octubre, 2013. vol 8, no. 3, p. 1191-1200.

HU, Xiangpei; SUN, Lijun y LIU, Linlin. A PAM approach to ahndling disruptions in real-time vehicle routing problema. En: Decision support systems. Diciembre, 2012. vol 54, p.1380-1393.

HU, Zhi-Hua y SHENG, Zhao-Han. A decision support system for public logistics information service management and optimization. En: Decision support systems. Diciembre, 2013. vol 59, p.219-229

IBEAS, Angel, et al. Urban freight transport demand: transferability of survey results analysis and models. En: Procedia - Social and Behavioral Sciences. 2012. vol 54, p. 1068-1079.

INGLADA, Luis y TEIXIDÓ, Narcís. Ciudad y mercancías: logística urbana. Políticas de movilidad y soluciones de gestión de la logística urbana para las empresas y los organismos públicos. 2 ed. México: Alfaomega, 2013. p. 160.

JOBORN, Martin; et al. Economies of scale in empty freight car distribution in scheduled railways. En: Transportation science. Mayo, 2004. vol 38, no. 2, p. 121-134.

KELLEY, Jason; KUBY, Michael y SIERRA, Rodrigo. Transportation network optimization for the movement of indigenous goods in Amazonian Ecuador. En: Journal of Transport Geography. 2013. vol 28, p. 89-100.

KIRLIK, Gokhan y SIPAHIOGLU, Aydin. Capacited arc routing problema with deadheading demands. En: Computers & operations research. 2012. vol 39, p. 2380-2394.

LABBÉ, M., YAMAN, H. y GOURDIN, E., 2005. A branch and cut algorithm for the hub location problems with single assignment. En: Mathematical Programming. 2005. Vol 102, p. 371–405.

LEE, Hsin-Yun. Optimizing schedule for improving the traffic impact of work zone on roads. En: Automation in Construction. Mayo, 2009. vol 18, p. 1034–1044.

LI, Jing-Quan, MIRCHANDANI, Pitu y BORENSTEIN, Denis. The vehicle rescheduling problem: Model and algorithms. En: Networks. 2007. vol. 50, no 3, p. 211–229.

LIAO, Tsai y HU, Ta-Yin. An object-orientate evaluation framework for dynamic vehicle routing problems under real-time information. En: Expert systems with applications. 2011. vol 38, p. 12548-12558.

LIN, Canhong, et al. A genetic algorithm-based optimization model for supporting Green transportation operations. En: Expert systems with applications. 2014. vol 41, p.3284-3296.

LINDHOLM, Maria y BEHRENDTS, Sonke. Challenges in urban freight transport planning-a review in the Baltic sea region. En: journal of transport geography. 2012. vol 22, p. 129-136.

LONDOÑO, James, CORREA, Mauricio Andres y PALACIO, Carlos Alberto. Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. En: Revista EIA. 2011.

LOZANO, Angelica, et al. Analysis of hazmat transportation accidents in congested urban areas, based on actual accidents in Mexico. En: Procedia Social and Behavioral Sciences. 2010. Vol 2, p. 6053–6064.

LOZANO, Angelica, et al. Impact of the recent environmental policies on the freight transportation in Mexico City. En: Procedia Social and Behavioral Sciences. 2012. vol. 39, p. 437-449.

LOZANO, Angelica, et al. New trends on physical distribution logistics in Mexico city Metropolitan Area. En: Planning on-street loading-unloading spaces considering the behavior pickup-delivery vehicles and parking enforcement. The Fifth International Conference on City Logistics, Crete Island, Greece, Julio 11-13 2007

MA, Xiaoliang, et al. An evaluation of microscopic emission models for traffic pollution simulation using on-board measurement. En: Environmental model asses. 2012. vol 17, p. 375-387.

MAIER, Sebastian y BASTO, Luciano. Economic feasibility of energy recovery from solid waste in the light of Brazil's waste policy: The case of Rio de Janeiro. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Octubre, 2014. vol 35, p. 484-498.

MAMASIS, K; MINIS, I y DIKAS, G. Managing vehicle breakdown incidents during urban distribution of a common product. En: Journal of the Operational Research Society. 2013. vol 64, p. 925-937.

MARCUCCI, Edoardo y DANIELIS, Romeo. The potential demand for a urban freight consolidation centre. En: transportation. Diciembre, 2013. vol 35, p. 269-284.

MARTINEZ, Elba y VARGAS, Marta. La investigación sobre la educación superior en Colombia. ICFES. 2002.

MEIDUTÉ, Leva. Economical evaluation of logistics centres establishment. En: Transport. Febrero, 2007. vol 22, no 2, p. 111-117.

MOHAMMADI, M; TORABI, S Y TAVAKKOLI-MOGHADDAM. Sustainable hub location under mixed uncertainty. En: Transportation research part E. Diciembre, 2013. vol 62, p 89-115.

MOLINA, Nancy. ¿qué es el estado del arte?. En: Ciencia y Tecnología para la salud visual y ocular. julio 2005 Vol 5. p. 74,75.

MU, Quianxin; et al. Disruption management of the vehicle routing problem with vehicle breakdown En: Journal of the Operational Research Society. 2010. vol 64, no 4, p. 742-749.

MUÑUZURI, Jesus. LARRAÑETA, Juan y MUÑOZ, Carlos. II CONFERENCIA DE INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN. (5-6 SEPTIEMBRE 2002: Vigo, Roma). La logística Urbana de Mercancías: Soluciones, Modelado y Evaluación. CIO, 2002.

MUÑUZURI, Jesus y CORTÉS, Pablo. Recent advances and future trends in city logistics. En: journal of computational science. Abril, 2012. Vol 3. P 191-192.

MUÑUZURI, Jesus, et al. Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. En: cities. 2005, vol 22. No.1. p 15-28.

NAGHI, Mohammad. Metodología de la investigación. 2 ed. México: editorial Limusa, 2005. p. 68.

NAKAMURA, Y, et al. A macroscopic traffic simulator for evaluating urban transport measures for heavy vehicles. En: Innovations in city logistics. 2008, p. 185-196.

NEMHAUSER, George L. The age of optimization: solving large-scale real world problems. En: operations research. Enero, 1994. Vol.42, no .1 , p 5-13.

NICKL, Michael. La evolución del concepto “Logística” al de “Cadena de suministros” y más allá. En: compras y existencias. Septiembre, 2005. Vol 140. p 15-19.

NUZZOLO, Agostino;, CRISALLI, Umberto y COMI, Antonio. A delivery approach modeling for urban freight restocking. En: Journal of civil engineering and architecture. 2012. vol. 6, no. 3, p. 251-267

NUZZOLO, Agostino y COMI, Antonio. Urban freight demand forecasting: A mixed quantity/delivery/vehicle-based model. En: Transportation Research Part E. 2014. vol 65, p. 84-98

O’KELLY, Morton. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. En: European Journal of Operational Research. 1987. Vol 32, p. 393–404.

OKELLY, Morton. Hub facility location with fixed costs. Papers in Regional Science. 1992. vol 71, p. 293–306.

OLIVERA, Leise Kelly y DIAS, Emilia. A Diagnosis Methodology for Urban Goods Distribution: A Case Study in Belo Horizonte City (Brazil). En: *Procedia Social and Behavioral Sciences*. 2014. vol. 125, p. 199-211.

OLSSON, Jerry y WOXENIUS, Johan. Localisation of freight consolidation centres serving small road hauliers in a wider urban area: barriers for more efficient freight deliveries in Gothenburg. En: *Journal of transport Geography*. 2014. vol 34, p. 25-33.

PERRIER, Nathalie; LANGEVIN, André y AMAYA, Ciro-Alberto. Vehicle Routing for Urban Snow plowing operations. En: *Transportation science*. Febrero, 2008. vol 42, no 1, p. 44-56.

PORTUGAL, Linicio da Silva, MORGADO, Andréa y LIMA, Orlando. Location of cargo terminals in metropolitan areas of developing countries: the Brazilian case. En: *Journal of transport geography*. Julio 2011. vol. 19, no. 4, p. 900-910.

PUREZA, Victoria, MORABITO, Reinaldo y REIMANN, Marc. Vehicle routing problem with mutiple deliverymen: modeling and heuristic approaches for the VRPTW. En: *European journal of operational research*. Diciembre, 2011. vol 218, p.636-647.

QUAK, Hans y KOSTER, Rene. Delivering goods in urban areas: How to deal with urban policy restrictions and the environment. En: *Transportation Science*. 2009. vol. 43, no. 2, p. 211 - 227.

QUAK, Hans y KOSTER, Rene. The impacts of time access restrictions and vehicle weight restrictions on food retailers and the environment. En: *European Journal of Transport and Infrastructure Research*. 2006. vol 6, no. 2, p.131-150.

RAMOS, Andres. Et al. Modelos matemáticos de optimización. Universidad pontificia comillas de Madrir, 2011. p 12-14.

ROBINSON, R. Welcome to OR Territory. En: OR/MS Today. Agosto, 1999. p 40-43.

ROBUSTE, Fransec. CAMPOS, José y GALVAN, Dante. Nace la logística urbana. Universidad politécnica de Cataluña.

RODRIGUEZ, P.A y BEHRENTZ, E. Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas. En: Revista de ingeniería. 2009. No 31, p. 14-31.

ROJAS, Sandra. El estado del arte como estrategia de formación en la investigación. En: Studiositas. Septiembre, 2007. Vol. 2. p 7.

RONZA, Andrea, et al. (2009). Economic valuation of damages originated by major accidents in port areas. En: Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Septiembre, 2009. vol. 22, p. 474–483.

RUAN, Minyan; LIN, jie y KAWAMURA, Kazuya. Modeling urbean comercial vehicle daily tour chaining. En: Transportation research part E. Febrero, 2012. vol 48, p. 1169-1184.

SANZ, Guillermo. PASTOR, Rafael y BENEDITO, Ernesto. Distribución urbana de mercancías: descripción y clasificación de soluciones existentes e implementación de dos soluciones novedosas. En: Dyna. Vol. 179. Junio, 2013. p. 6-13.

SCHTEINGART, Martha. The environmental problems associated with urban development in Mexico City. En: Environment and urbanization. Abril, 1989. vol. 1, no. 1, p 40-50.

SERRANO, Javier. Financiamiento de infraestructura de transporte. En: Revista de ingeniería. 2010. No 32, p. 108-116.

SHAH, Nirav, et al. Optimization models for assessing the peak capacity utilization of intelligent transportation systems. En: European Journal of Operational Research. Junio, 2011. vol 216, p. 239-251.

SKRINJAR, Jasmina. ROGIE, Kristijan y STANKOVIC, Ratko. Location of urban logistic terminals as hub location problem. En: Traffic&Transportation. 2012. Vol. 24, No. 5, 433-440.

SUKSRI, Jintawadee y RAICU, Raluca. Developing a conceptual framework for the evaluation of urban freight distribution initiatives. En: Procedia social and behavioral sciences. 2012, vol. 39. P 321-332

TAHA, Hamdy. Investigación de operaciones. 7 ed. México: Pearson Education, 2004. p 8,9.

TANIGUGHI, Eiichi y SHIMAMOTO, Hiroshi. Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. En: Transportation research part C. 2004, vol 12, p. 235-250.

TANIGUCHI, Eiichi, et al. Emerging techniques for enhancing the practical application of city logistics models. En: Procedia social and behavioral sciences. 2012, vol. 39. P 3-18.

TANIGUCHI, Eiichi y THOMPSON, Rusell. Modeling city logistics. En: Transportation research record. Enero, 2007. vol 1790, p. 45-51.

TEDESCO, Giovanna Megumi Ishida y YAMASHITA, Yaeko. A methodology for the diagnosis of a transport system. XXII ANPET. Fortaleza. 3-7 noviembre 2008.

TIMMS, Paul. Transferability of urban freight transport measures: A case study of Cariacica (Brazil). En: Research in Transportation Business & Management. Febrero, 2014. vol. 11, p. 63-74.

TOPCUOGLU, H. et al. Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms. En: Computers & OR. 2005. vol 32, p. 967-984.

TRICOIRE, Fabien; GRAF, Alexandra y GUTJAHR, Walter. The bi-objective stochastic covering tour problema. En: Computers & operational research. Septiembre, 2011. vol 39, p. 1582-1592.

TSAMBOULAS, Dimitri, VRENKEN, Huub y LEKKA, Anna-Maria. Assessment of a transport policy potential for intermodal mode shift on a European scale. En: Transportation research part A. Octubre, 2007. vol. 41, no. 8, p. 715–733.

TURBLOG. Transferability of urban logistics concepts and practices from a worldwide perspective. Deliverable 4: “Transferability guidelines and evaluation”. 2011.

VICENTINI, Monize, et al. Review of real-time vehicle schedule recovery methods in transportation services. En: Journal of Scheduling. 2013. vol. 8, p. 1-27.

WHITE, Leroy, SMITH, Honora y CURRIE, Christine. OR in developing countries: A review. En: European journal of operational research. Febrero, 2010. vol. 208, p. 1-11.

YAMADA, Tadashi, et al. Designing Multimodal Freight Transport Networks: A heuristic Approach and Applications. En: Transportation science. Mayo, 2009. vol 43, no 2, p. 129-143.

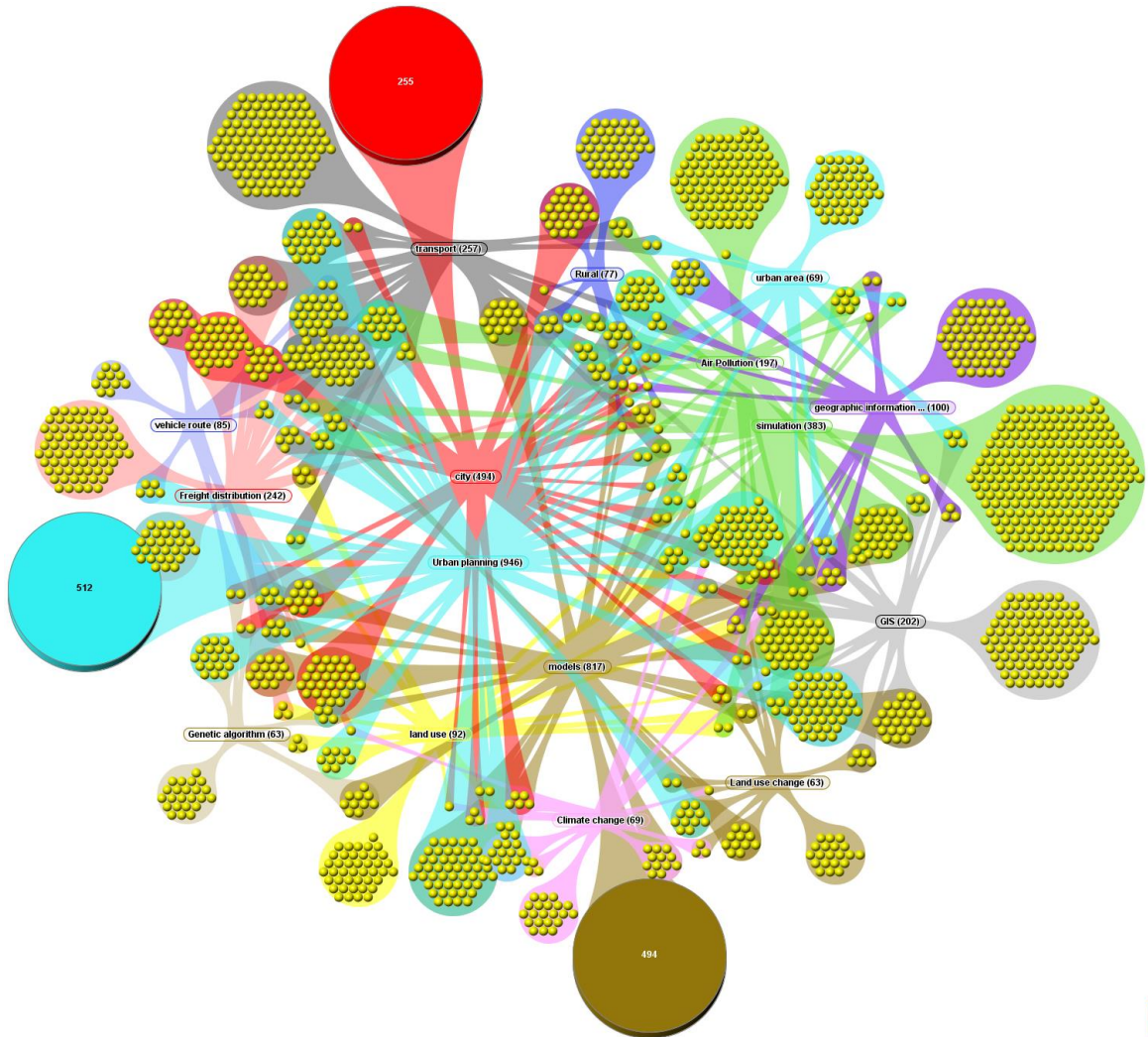
YAN, Shangyao; LIN, Jenn-Rong y LAI, Chun-Wei. The planning and real-time adjustment of courier routing and scheduling under stochastic travel times and demands. En: Transportation research part E. Enero, 2013. vol 53, p. 34-48.

YU, Junfang y DONG, Yuanyuan. Maximizing profit for vehicle routing under time and weight constraints. En: International Journal of Production Economics. Mayo, 2013. Vol 145, p. 573-583.

ZHANG, Tao; CHAOVALITWONGSE, W.A y ZHANG, Yuejie. Scatter search for the stochastic travel-time vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. En: Computers & operations research. Diciembre, 2011. vol 39, p. 2277-2290.

ANEXOS

Anexo A. Resultado de la búsqueda



Anexo B. Tabla problemas de la logística urbana de mercancías

LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS		
PROBLEMA	OBJETIVO	VARIABLES USADAS
Predicción de la demanda.	Determinar viajes producidos por la DUM en una ciudad, información necesaria para la creación de políticas adecuadas y de nueva infraestructura.	Inicialmente se determinan la cantidad de viajes para zonas estratégicas de la ciudad según cantidad de negocios (Nuzzolo), empleados (Gentile) y sector económico al que pertenecen (Vigo). Sin embargo esta información puede presentar variaciones grandes respecto a los verdaderos comportamientos de la distribución de mercancías, por lo que se empiezan a hacer estudios de <i>state of preference</i> (Nuzzolo, Marcucci).
Infraestructura.	Identificar la manera de invertir en infraestructura, de manera que según las necesidades se logre el mayor beneficio posible.	Tiene en cuenta las diferentes opciones de inversión e identifica las que mayor retorno socioeconómico presenten según las necesidades de la ciudad. Tienen en cuenta factores como: viabilidad económica, longevidad del proyecto, duración de construcción (Brauers) e impacto en el tráfico (Meiduté) y ambiental (Yamada).
Localización	Localizar facilidades logísticas dentro	Inicialmente busca una localización que disminuya el costo de transporte, teniendo en cuenta restricciones de capacidad (Okelly). Después se agrega una distribución probabilística

<p>facilidades logísticas.</p>	<p>de la ciudad, de forma que la cadena logística logre una estructura que mejore la DUM.</p>	<p>a ciertas variables como predicción de la demanda y tiempos de distribución (Awasthi), finalmente se tienen en cuenta parámetros económicos, ambientales y sociales en la localización de facilidades logísticas (Mohammadi).</p>
<p>Tráfico.</p>	<p>Optimizar el flujo del tráfico mediante la programación adecuada de rutas de vehículos de distribución de mercancías.</p>	<p>Tratado principalmente con el problema VRP inicialmente tiene en cuenta restricciones de capacidad de los vehículos para disminuir costos o tiempos de distribución (Dantzig, Shah, Kirlik, Behrens), se agregan al objetivo de este problema reducir la carga vacía del <i>backhaul</i> (Aras, Gribkovskaia Yu, Lin, Ruan), reducir la cantidad de vehículos usados (Perrier, Purezza, Boonprasurt, Aized). Se agregan variables estocásticas al problema especialmente para los valores de tiempo de recorrido y demanda (Tricoire, Cheng, Zhang, Ghannadpour) Variables dinámicas para obtener información verídica en tiempo real (Hu, Yan, Hsu, Liao, Taniguchi, Mu, Mamasis, Lee, Giridhar) y finalmente variables que disminuyan el daño ambiental causado por el transporte de mercancías (Ando, Ericsson, Belkas, Ma, Demir, Cirovic, Erdo,</p>

Anexo C. Tabla recopilatoria de artículos

AÑO	PROBLEMA	ENFOQUE	AUTOR	PAÍS	METODOLOGÍA			Metodología	ESTUDIO
					Método exacto	Heurística	Metaheurística		
2004	Ruteo	Programación ruta y horarios (enfocado en trenes)	Joborn, Crainic, Gendreau, Holmerg y Lundgren	CANADA			X		
	Ruteo	asume tiempo de distribución dinámico	Taniguchi y Shimamoto	JAPON			X		
2005	Localización	Desempeño de algoritmo genético para el Hub location problem	Topcuoglu, Corut, Ermis y Yilmaz	TURQUÍA		X			
	Localización	Desempeño de metaheurísticas para el hub location problem	Labbé, Yamany Gourdin.	TURQUÍA			X		
2006	Ruteo	Dinamico para rutas automatizada	Giridhar y Krumar	ESTADOS UNIDOS			X		
	Ruteo	modelo de ruteo que mide emision de gases en recorrido. Aun no es considerado un factor a minimizar	Ando y Taniguchi	JAPON			X		
	Ruteo	Estudio emision de gases en ruteo	Ericcson, Larsson y Brundell	SUECIA					X

2007	Predicción demanda	Ineficiencia modelos commodity based para DUM	Holguin-Veras y Thorson	ESTADOS UNIDOS					X
	Infraestructura	Evaluación financiera, impacto de localización en tráfico, inversión e ingresos	Meiduté	LITUANIA				X	
2008	Ruteo	Ruteo VRPSPD, satisfacción de demanda según vehículos disponibles	Gribkovskai, Laporte y Shyshou	CANADA			X		
	Localización	Estado del arte de hub location problem	Alumur y Kara	TURQUÍA	X	X	X		X
	Infraestructura	Inversion en vías basado en modelo de optimización multiobjetivo	Brauers, Kasimieras, Peldschus y Turskis	LITUANIA				X	
	Ruteo	Ruteo con características especiales de vehículos	Perrier, Langevin y Amaya	CANADA			X		
2009	Ruteo	Rutas a largo plazo basado en probabilidad de visitar ciertas calles	Chen, Wolden, Wong y Zhong	ESTADOS UNIDOS			X		
	Ruteo	Dinamico para proyectos de infraestructura con vehículos grandes	Lee	CHINA			X		

	Infraestructura	Selección de posibles acciones de inversión teniendo en cuenta factor ambiental y tráfico	Yamada, Russ, Castro y Taniguchi	FILIPINAS		X			
2010	Localización	Variables fuzzy al de problema localización	Awasthi, Chauhan y Goyal	CANADA			X		
	Ruteo	Cuales rutas realizar basado en restricción de vehículos	Aksen y Tekin	TURQUÍA			X		
	Ruteo	Ruteo, satisfacción de demanda según vehículos disponibles	Aras, Aksen y Tekin	TURQUÍA		X	X		
	Ruteo	Reprogramación en tiempo real cuando hay accidentes y vehículos de refuerzo	Mu, Zu, Lyzgaard y Eglese	CHINA			X		
2011	Ruteo	Recopilación VRP con variables estocásticas y modelo con tiempo de distribución con distribución probabilística	Zhang, Chaovalitwongse y Zhang	INGLATERRA	X	X	X		
	Ruteo	Ruteo, cantidad de vehículos basada en mano de obra	Pureza, Morabito y Reimann	BRASIL			X		

	Ruteo	Disminuir demanda sin cumplir agregando distribución probabilística a esta variable	Tricoire, Graf y Gutjahr	AUSTRIA		X			
	Ruteo	Ruteo aprovechando al máximo la capacidad de las vías.	Shah, Kumar, Bastani y Yen	ESTADOS UNIDOS	X	X			
	Ruteo	Ruteo. Determina valor mínimo de mercancía de vuelta para hacer recorrido	Behrens y Picard	CANADA			X		
	Ruteo	Asume tiempo de distribución como una variable dinámica, reasignación de rutas para evitar tráfico	Liao y Hu	CHINA			X		
	Ruteo	Disminución de costos y emisiones	Belkas y Laporte	CANADA			X		
2012	Ruteo	Ruteo, cantidad de vehículos basada en mano de obra	Boonprasurt y Nanthavanij	KOREA	X		X		
	Predicción demanda	Viajes en puntos específicos según teoría gravitacional, tiene en cuenta empleados	Nuzzolo, Crisalli y Comi	ITALIA				X	

	Localización	Comparación de métodos exactos y heurísticos para diferentes problemas de localización	Skrinjar, Rogie y Stankovic	CROACIA	X	X			
	Predicción demanda	Transferibilidad de modelos de predicción demanda	Ibeas, Moura, Nuzzolo y Comi	ITALIA					X
	Ruteo	Horas para rutas ya programadas con VRPSDP	Ruan, Lin y Kawamura	ESTADOS UNIDOS			X		
	Ruteo	ruteo disminuir viajes con carga vacia	Kirlik y Sipahioglu	TURQUÍA			X		
	Ruteo	reprogramación de rutas en tiempo real basada en conocimiento. Cambiar lo menos posible la ruta inicial	Hu, Sun y Liu	CHINA			X		
	Ruteo	Calibración para medir índices de emision	Ma, Lei y Chen	CHINA				X	
2013	Predicción demanda	Modelo indexado según sector económico y gravitacional	Gentile y Vigo	ITALIA				X	
	Predicción demanda	Demanda específica para un centro de distribución basada en State of preference	Marcucci, Danielis	ITALIA				X	

Localización	Localización con variables fuzzy y costos por emisión y ruido	Mohammadi, Torabi y Tavakkoli	IRAN			X		
Ruteo	Recopilación VRP con variables fuzzy y modelo con tiempo de recorrido y satisfacción de cliente con variables fuzzy	Ghannadpour, Noori y Tavakkoli	IRAN			X		
Ruteo	Reprogramación en tiempo real para máxima satisfacción de demanda cuando hay accidentes y no hay más vehículos	Mamasis, Minis y Dikas	GRECIA		X			
Ruteo	Ruteo y programación de horarios para efectividad de recorrido backhaul	Yu y Dong	ESTADOS UNIDOS			X		
Ruteo	Dinámico, tiempo de recorrido variable dinámica	Hsu y Lin	CHINA			X		
Ruteo	Dinámico, actualizando capacidad de carga para hacer pickups	Hu y Sheng	CHINA			X		
Ruteo	Considera la variable Demanda dinámica	Yan, Lin y Lai	CHINA			X		

	Ruteo	disminuir consumo de combustible y tiempo de recorrido	Demir, Betas y Laporte	SUECIA			X		
2014	Predicción demanda	Viajes y vehiculos necesarios basados en demanda de productos. State of preference	Nuzzolo y Comi	ITALIA				X	
	Localización	Estudio de necesidad de centros logísticos	Olsson y Woxenius	SUECIA					X
	Ruteo	Reduccion costo ambiental y economico para VRPSDP	Lin, Choy y Ho	HONG KONG			X		
	Ruteo	Reduccion costo ambiental , mano de obra y distancias	Bing, Keizer, Bloemhof y Van der Vorst	HOLANDA			X		
	Ruteo	Flota de vehiculos mixta (amigable con medio ambiente). Asignar carga y rutas que reduzcan emision	Cirovic, Pamucar y Bozanic	SERBIA			X		
	Ruteo	Vehiculos amigables teniendo en cuenta que hay pocos lugares para recargas esos vehiculos	Erdo y Miller	ESTADOS UNIDOS			X		

ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS

STATE OF THE ART OF OPTIMIZATION MODELS FOR CITY LOGISTICS

JOAN MANUEL ULLOA MURCIA
INGENIERO INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
JOANMULLOA@HOTMAIL.COM
BUCARAMANGA, COLOMBIA

RESUMEN

La logística urbana de mercancías se centra en la distribución de bienes dentro de las ciudades para el aprovisionamiento a establecimientos empresariales o directamente a los consumidores finales, una buena gestión de la logística urbana de mercancías se verá reflejado en una disminución del tráfico, emisión de gases contaminantes, costos y tiempos de transporte, y una mejora en la calidad de vida de ciudadanos y crecimiento económico de la ciudad. El presente estado del arte reúne los modelos de optimización que se han desarrollado para la logística urbana de mercancías a partir del 2004, que incluyen diferentes ámbitos como la predicción de la demanda, inversión en infraestructura, localización de facilidades logísticas y modelos de VRP.

PALABRAS CLAVE: Logística urbana de mercancías, Distribución de mercancías, modelos de optimización, estado del arte, Vehicle routing problem.

ABSTRACT

City logistics focuses on goods distribution inside the cities to supply business or customers, good management of city logistics will reduce traffic, Green house emission, transportation costs and times, and an improvement on quality life of the citizens and economic development of the city. This document summaries optimization models developed for city logistics since 2004, it includes demand prediction, financial evaluation, hub location and VRP models.

KEYWORDS: City logistics, Freight distribution, Optimization model, state of the art, Vehicle Routing Problem.

1. INTRODUCCIÓN

La logística urbana estudia cómo las personas, mercancías e información superan el tiempo y la

distancia de forma eficiente, mediante la optimización de los servicios que ofrece una ciudad. La logística urbana de mercancías es el eslabón de la cadena de transporte que se sitúa dentro de la ciudad, se encarga de la gestión adecuada de la distribución de mercancías dentro de la ciudad, sea para aprovisionar a consumidores o empresas.

Los problemas que se manejan en la distribución urbana de mercancías han evolucionado a medida que cambia el entorno en que se desarrolla, su tratamiento y entendimiento es cada vez más complejo, si se tiene en cuenta la mayor demanda de bienes en las ciudades, que aumentan las operaciones de logística urbana. Estudios realizados por Linholm y Behrends (2012) indican que actualmente sus actividades generan entre el 20% y 30% del tráfico de las ciudades, y representa la emisión de al menos el 50% de contaminantes en el ambiente, además de ser el mayor generador de tráfico y accidentes. Por lo anterior, en muchos países es más importante el buen manejo de la distribución de mercancías, que la gestión de la movilidad de las personas, sea en bicicleta, motocicleta, vehículo privado, sistema de transporte público o como viandante (persona que transita a pie por espacios públicos).

La logística urbana se encuentra en la última milla de la cadena logística, etapa del proceso de transporte que por lo general presenta mayores costos, lo cual repercute en el costo final del producto. Involucra procesos complejos que se relacionan directamente con características dinámicas de la ciudad, principalmente con el tráfico y la movilidad, que presentan alto grado de incertidumbre, afectando así la efectividad del proceso.

Dado que todas las ciudades tienen características diferentes se descarta la posibilidad de un modelo de logística urbana de mercancías aplicable de forma general. Sin embargo, tener claro los actores (administración pública, sector privado: clientes, proveedores, transportadores) que hacen parte en la distribución de mercancías y sus interacciones, hace más fácil la adaptación, creación y mejoramiento de modelos.

Según Inglada y Teixido (2013) los principales objetivos de la logística urbana de mercancías están relacionados con una mejora social, ambiental y económica. El objetivo ambiental busca la reducción de cualquier perjuicio al medio ambiente, principalmente el generado por la

emisión de gases contaminantes típica de los vehículos transportadores, como son el N₂O y CO₂, cuya producción es proporcional al combustible consumido por el vehículo como afirma Taniguchi y Thompson (2007). El objetivo social busca mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, disminuir el riesgo de accidentes y garantizar su salud. El objetivo económico descrito por Anand et al (2012) busca principalmente garantizar la prosperidad de la ciudad, con una oferta de empleos y ofreciendo productos que les permita ser competitivos.

Para el cumplimiento de estos objetivos se han desarrollado modelos de optimización y acciones normativas como la creación de horas valle, peajes, prohibición de acceso de vehículos transportadores de mercancía a ciertas zonas de la ciudad, acciones informativas, de señalización, de planeación y de seguimiento.

2. PROBLEMAS DE LA LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS

En este capítulo se describen los problemas de la logística urbana de mercancías que han sido estudiados con modelos de optimización.

El problema de predicción de la demanda de logística urbana es uno de los más críticos de la distribución de mercancías, pues esta indica si la creación de infraestructura o políticas es necesaria en las ciudades. A pesar de su importancia, según Gentile y Vigo (2013) hay pocos modelos que manejan el tema, pues la mayoría de información que se encuentra son descripciones de la distribución de mercancía en diferentes tipos de ciudades, que tras múltiples estudios logran determinar el promedio de viajes para ciertas zonas de una ciudad.

Otro problema es la decisión de inversión en infraestructura, esta juega un papel importante en las ciudades, pues son facilidades para el desarrollo económico, seguridad vial y control de la densidad del tráfico Yamada et al (2009). La decisión se puede evaluar calculando el beneficio que presente, con un análisis de sus costos y retorno. Aunque ya hay múltiples métodos y modelos para evaluar estos problemas, según Meiduté (2007) pocos se han diseñado para tratar específicamente el problema en proyectos de inversión para infraestructura de la logística urbana de mercancías. Los existentes sirven como

una guía de referencia útil para la evaluación de inversión en infraestructura.

La localización de facilidades logísticas es otro problema que le concierne a la logística urbana, pues esta define la forma y estructura de la cadena logística en la que se van a desarrollar las actividades de transporte urbano. Alumur y Kara (2008) dicen que la localización es su aspecto más estudiado, porque de esta depende que se logre una reducción del impacto en el medio ambiente, residentes, costos de distribución y mayor cobertura de la demanda.

El problema más estudiado en la DUM es la programación de vehículos, esta se encarga de planificar los días, horas de salida y de llegada, cargas y rutas de la distribución de mercancías. Según el tipo de negocio algunos modelos son considerados tácticos, pues las rutas se planean por periodos de tiempo prolongados, porque los clientes y demandas que manejan son estables por esos periodos de tiempo. Por otro lado hay rutas de distribución que se deben programar todos los días, porque los clientes y las demandas de estos varían constantemente, por lo que se considera un problema de nivel operacional. Para la solución de este problema se han desarrollado múltiples modelos VRP, que han sido ampliamente estudiados en la literatura, por lo que en el estado del arte se presenta una taxonomía para describir la evolución que han presentado estos modelos.

3. MARCO PARA LA REVISIÓN DE LA LITERATURA

La búsqueda para la elaboración del estado del arte se realizó con la intención de incluir los modelos de optimización de la logística urbana en una ventana de tiempo de 10 años (2004-2014). Se siguió la metodología propuesta por Galeano y Vélez (2002). La consulta y recopilación de información se realizó en las bases de datos más importantes de temas logísticos como ISI Web of knowledge, Elsevier, Scopus y Springer.

4. ESTADO DEL ARTE DE LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN EN LA LOGÍSTICA URBANA DE MERCANCÍAS

Basado en la información encontrada para el desarrollo del presente estado del arte, se clasificaron los modelos de optimización, según su objetivo, en modelos que buscan soluciones a

nivel estratégico y a nivel operacional. Los modelos estudiados fueron los siguientes:

4.1 Modelos de optimización de la logística urbana a nivel estratégico

Los modelos para soluciones a nivel estratégico de la logística urbana, tratan de forma general el problema de toma de decisiones para la creación de infraestructura que mejore la distribución de la mercancía dentro de las ciudades. Esta decisión se considera estratégica por los altos costos que requiere su desarrollo, su tiempo de ejecución, y porque se espera que su funcionamiento sea por un periodo de tiempo prolongado. Los artículos analizados abordan problemas de inversión, predicción de la demanda y localización de centros logísticos.

4.1.1 Modelos de predicción de la demanda en la logística urbana de mercancías. Holguín-Veras y Thorson (2007) aclaran que para que un modelo de predicción de demanda de la logística urbana sea útil, no puede estar basado en la medición de la cantidad de mercancía a distribuir, sino en la cantidad de viajes que esta genera, por lo que los modelos de predicción basado en los productos (commodity based models) no se ajustan a las características de la demanda de la distribución de mercancías.

Nuzzolo, Crisalli y Comi (2009) proponen un método gravitacional para la predicción de demanda de la DUM, El modelo se basa en una teoría gravitacional, donde se identifican los principales puntos donde se recolecta la mercancía (que por lo general están centrados), estos puntos donde hay un movimiento logístico importante se denominan portales y a cada uno es asignado un peso según la cantidad de mercancía y vehículos que manejen. Luego se identifican los puntos generadores de transporte de mercancías, los cuales son considerados centroides. Con los portales y centroides se organiza una matriz de atracción, donde se relaciona cada punto de origen con su destino, asignando un vector que contiene información de distancia y costos de transporte para cada recorrido. El modelo también tiene en cuenta la de cantidad de empleados en la zona, lo que permite acercarse más a una magnitud verdadera de la demanda de mercancía.

Gentile y Vigo (2013) proponen dos modelos para estimar el número de viajes producidos por cada ciudad por movimiento de mercancía. El primero es un modelo lineal indexado, se considera

indexado porque trabaja con información de promedios y se aplica a una estructura de clasificación. Para calcular los viajes el modelo diseña un “árbol” para cada ciudad, que va a recopilar la información de su comercio, siendo los nodos los sectores comerciales que se desempeñan en la ciudad y las ramas los subsectores de estos. Basados en información de los viajes que genera cada sector, a cada nodo se asigna una cantidad de viajes y estos se distribuyen en sus subsectores, la información es calibrada con el algoritmo mínimo cuadrado no negativo de Lawson. La suma de los nodos con sus respectivas ramas determinará el total de viajes en la ciudad.

Su segundo modelo es un modelo gravitacional similar al de Nuzzolo, difieren en que este no tiene en cuenta la cantidad de empleados en la zona y se puede complementar con problemas de asignación de ruta, para identificar el flujo adecuado entre origen-destino, y ajustar este para disminuir el tráfico generado por la DUM. Hasta ahora ningún modelo ha trabajado estos problemas juntos.

Los modelos de predicción de demanda de la logística urbana previamente mencionados han sido validados, aplicándolos a una ciudad específica, sin embargo todas las ciudades presentan características económicas muy diferentes, desde su tamaño, hasta el tipo de bienes que maneja. Por lo que Ibeas et al (2012) hicieron un análisis de transferibilidad para el modelo gravitacional de Nuzzolo. El estudio concluye que no es posible generalizar y transferir los modelos a todas las ciudades, pues su tamaño, estructura y regulaciones influye altamente en el desempeño del modelo. Así mismo, para tener una predicción de demanda de DUM acertada es necesaria una larga recolección de información de la ciudad a estudiar.

Debido a esta necesidad de hacer un análisis detallado para cada ciudad, con información específica de esta, se han creado modelos de estado de preferencia (state of preference) que buscan a través de la recolección de información detallada, comprender de mejor manera el comportamiento de los actores de la logística urbana de mercancía, para a partir de sus decisiones prever su demanda.

Marcucci y Danielis (2013) dan una guía para el cálculo de la demanda potencial para un centro de distribución, basada en un modelo de estado de preferencia, este recolecta información a través de

encuestas a las empresas distribuidoras y transportadores de la zona. El modelo permite hacer un análisis de sensibilidad para ver como un cambio en las políticas del centro de distribución varía su posible demanda.

Nuzzolo y Comi (2014) presentan otro modelo de estado de preferencia, que mide la demanda de cantidad de productos, viajes generados por estos y los vehículos necesarios para su distribución. Al igual que el modelo anterior parte de encuestas a los actores y sus comportamientos, pero complementa esto con matrices origen-destino para comprender mejor el flujo de la mercancía, sus viajes y vehículos. La matriz de mercancía determina la cantidad de flujo entre zonas, la matriz de viajes calcula los tours realizados para la entrega de la mercancía, y la matriz de vehículos mide la cantidad de paradas en un determinado tour, las 3 matrices enmarcadas en cierto periodo de tiempo. Cada matriz es calibrada según la información recolectada en las encuestas.

4.1.2 Modelos de decisiones de inversión en la logística urbana de mercancías. Brauers et al (2008) proponen un modelo discreto multiobjetivo para identificar la mejor inversión en vías, desarrollado con el método MOORA (optimización multiobjetivo en base a análisis de radio). Este método tiene 2 componentes: un sistema de radio y una aproximación al punto de referencia. Para su desarrollo se debe organizar una matriz con una lista de objetivos con sus respectivas alternativas de inversión. El sistema de radio asigna un valor a cada alternativa y cuyo resultado es anclado a esta como un vector, según el objetivo se selecciona el máximo o el mínimo valor posible para cada uno. A partir de esto se hace un ranking con todas las alternativas y como estas ayudan al cumplimiento de los objetivos, la que tenga un mayor valor será la alternativa seleccionada. La principal falla del modelo es que no se pueden agregar coeficientes en los objetivos a cumplir, para dar un peso según su importancia.

Por otro lado Meidutė (2007) propone un modelo financiero para la evaluación socioeconómica de infraestructura de centros de distribución, ya sea por parte de la administración pública o sector privado. El modelo busca optimizar los escenarios de inversión con la información de servicios a prestar, localización su dimensión, costos, inversión y evaluación financiera. El objetivo es maximizar el retorno del proyecto, calculando su tasa de retorno y flujos de caja, y determinar la mejor fuente de financiación para este.

Se debe calcular la demanda según los servicios que ofrecerá el centro de distribución, y con esto determinar sus costos de equipos y de operación, además de la dimensión y localización es posible hallar sus costos de adquisición y construcción. Los ingresos se calculan según los servicios prestados y la demanda esperada, este momento de evaluación permite tener claro si algunos servicios no son rentables para el centro de distribución, por ejemplo un servicio de almacenaje es poco interesante en una ciudad donde la mayoría de comercio es de alimentos perecederos, pues lo más importante para estas empresas es que su mercancía llegue lo más pronto posible a su destino, por lo que no les interesa que el centro de distribución les ofrezca el servicio de almacenaje. Otro tipo de servicio como la venta de gasolina en los centros de distribución puede ser muy rentable, pues mientras se hacen actividades de carga y descarga en este, se aprovecha este tiempo para tanquear los vehículos, que por lo general tienen un tamaño de tanque grande, por lo que se ahorra un tiempo considerable.

Yamada et al (2009) proponen un modelo para evaluar problemas de inversión de la logística urbana, que brinda la mejor combinación de acciones a realizar y mide el impacto que estas decisiones generarán en el tráfico, que es uno de los mayores problemas de la DUM. El modelo trata un problema DNDP (problema de diseño de redes discreto), con una programación de dos niveles. El nivel alto optimiza la combinación de acciones a implementar y el nivel bajo se encarga de la asignación del tráfico en la respectiva acción.

El nivel alto presenta un problema de optimización combinatorio, que busca maximizar la relación costo/beneficio de las posibles mejoras a implementar. Para seleccionar la combinación óptima de mejoras el problema se soluciona con el método heurístico GLS (Genetic Local Search), un híbrido que combina el Algoritmo genético con el local search. En el nivel bajo se seleccionan las rutas para los usuarios que se espera que usen la infraestructura, y mediante una matriz jacobiana permite conocer el flujo que se presentará entre todos los puntos a evaluar.

4.1.3 Modelos de optimización para la localización de facilidades logísticas. La mayoría de ciudades grandes cumplen con altos volúmenes de mercancía, densidad poblacional, múltiples

industrias y actores, sin embargo no siempre hay integración entre ellos, ni políticas que fomenten esa unión; esta interacción entre actores también se debe tener en cuenta pues influyen en el desempeño del centro logístico. Estudios realizados por Olsson y Woxenius (2014) demuestran el caso de ciudades con gran desarrollo económico en Canadá, donde la construcción de facilidades logísticas no generaría ningún impacto en su distribución de mercancías, por lo que no se hizo inversión en estas; mientras que en otras ciudades, como Chicago en Estados Unidos, la creación de facilidades logísticas causaría una reducción del 5,6% tráfico en la ciudad.

El método gravitacional descrito por Skrinjar, Rogie y Stankovic (2012) se usa desde el siglo XX para determinar la localización adecuada de facilidades logísticas, específicamente de bodegas de distribución, aún es ampliamente usado en fases preliminares de estudios de localización para estudiar áreas factibles, y sirvió como base para el desarrollo de modelos más avanzados. Este método organiza a los clientes en coordenadas según su ubicación y asigna un peso a cada uno dado por su demanda, a partir de esto halla un punto central para ubicar bodegas de distribución de tal forma que se minimicen los costos de distribución. Su solución por lo general no es la óptima, pero sirve como punto de partida para aproximaciones a soluciones óptimas.

A partir de este método se han creado diferentes modelos para tratar el problema de la localización de facilidades logísticas de una mejor manera.

El modelo típico para la localización de centros logísticos, trabajado por Morton Okelly (1987) usa la programación lineal entera para minimizar los costos de transporte asociados a la distribución de mercancías. Para este problema se considera la ubicación de los clientes y proveedores como nodos, a cada nodo se le asigna un peso, identificando las distancias y costos de transporte entre ellos. El problema selecciona como punto de localización los nodos donde se den los menores costos de todas las combinaciones posibles. Si bien el problema se desarrolló inicialmente para la minimización de los costos de transporte, también se puede plantear para que busque la minimización de tiempo, retrasos o distancia total recorrida, según la función que cumpla la facilidad a localizar.

El mismo Okelly (1992) hace mejoras al modelo que luego puede ser planteado como un problema lineal combinado que da a conocer el número de bodegas que se deben instalar y en qué puntos. Se contemplan dos variables de decisión: la primera, una variable binaria que determina si se debe instalar o no una facilidad logística en ese punto. La segunda indica la cantidad de mercancía que se deben transportar entre nodos, de lo cual se obtiene la capacidad requerida para cada facilidad a instalar.

Hay métodos matemáticos exactos para una solución óptima del problema de localización, o métodos heurísticos, el más popular de estos es el algoritmo genético trabajado por Topcuoglu et al (2005), que da buenos resultados aunque no garantiza la solución óptima. Algunos métodos de prueba y error también son aplicables a este problema de programación lineal, como el branch and bound o branch and cut trabajado por Labbé, Yaman y Gourdin (2005), los cuales asumen una combinación inicial como solución, y va comparando con soluciones diferentes, si la nueva solución es mejor que la inicial, se asume como la óptima, se descarta la solución previa y se repite el proceso hasta que no se encuentre una solución mejor. La gran cantidad de nodos que se deben considerar en un problema real, hace el problema de localización muy complejo, pues toma mucho tiempo encontrar este tipo de soluciones a los computadores.

La ubicación de facilidades logísticas es afectada por múltiples criterios, sin embargo en un estado del arte de modelos de localización de facilidades logísticas por Alumur y Kara (2008) para el 2007 ningún modelo manejaba este problema de manera multi-criterio. Por otro lado muchos parámetros son considerados determinísticos, a pesar que presentan un alto grado de incertidumbre y es importante tener en cuenta la variación de estos datos.

Awasthi, Chauhan y Goyal (2010) dan una distribución Fuzzy a parámetros que son difíciles de incluir en el modelo porque usan palabras en vez de números. La solución del modelo busca encontrar una localización donde los beneficios sean maximizados y los costos minimizados. Después de seleccionar cuales parámetros se van a tener en cuenta para el criterio de evaluación se debe asignar a cada uno un peso asignado por expertos, con los resultados de esta evaluación se puede saber la distribución de cada variable, que se considera triangular para las variables fuzzy. El

promedio de los resultados se asume como el valor más probable.

Una vez evaluados los múltiples criterios para cada alternativa, se organizan en una matriz, los resultados se comparan con la metodología Fuzzy TOPSIS, que selecciona la alternativa más cercana a la ideal y más lejana a la negativa. Esta metodología también permite hacer un análisis de sensibilidad del peso asignado a cada criterio, para analizar su importancia y efecto en la decisión.

Actualmente uno de los criterios más importantes a tener en cuenta en la DUM es el factor ambiental, por lo que Mohammadi y Tavakkoli (2013) dan un modelo que ayuda a la creación de una red de transporte de mercancías sostenible, con la localización de hubs con incertidumbre mixta (trabaja con variables determinísticas, fuzzy o probabilísticas). El modelo no tiene un enfoque únicamente económico, sino también ambiental y social, teniendo en cuenta índices de emisión de gases y ruido. Para tratar de manera adecuada el problema de contaminación, se mencionan 4 factores que afectan la emisión de gases en el transporte (tipo de vehículo, diseño de la red de distribución, equipo y combustible empleado).

El modelo tiene en cuenta los costos de transporte e instalación y asocia a la emisión de ruido y contaminación un costo de "castigo". Los costos de emisión se asume que vienen de dos fuentes: el hub y del recorrido que hace el vehículo durante la distribución. El costo de ruido solo se genera si los niveles de ruido pasan de un punto de referencia, este puede estar dado por políticas o la opinión de expertos. Con programación estocástica probabilística y la unión de costos mencionados sale la función a minimizar. Aplicando métodos de transformación a las variables con distribución fuzzy y poisson del problema, estas se integran y asumen valores probables, lo que convierte el modelo en un problema de programación lineal convencional.

El autor da dos posibles soluciones meta heurísticas: recocido simulado y un algoritmo competitivo imperialista. El recocido simulado haya una solución aleatoria y la asume como óptima, mediante interacciones de datos de su vecindario encuentra nuevas soluciones hasta no encontrar un mejor resultado. Por otro lado el algoritmo competitivo imperialista se basa en comportamientos socio-políticos, este asemeja los costos con países, los costos más significativos

son definidos como países imperialistas, el algoritmo va dando una jerarquía a los costos hasta que todos estén integrados como una colonia, adaptándose a los costos que tienen más poder.

Al comparar resultados con modelos de localización donde se tienen en cuenta solo los costos de transporte y localización, estos presentan un incremento, pero disminuye otros gastos directos e indirectos sociales, lo que lleva a una disminución del costo total.

4.2 Modelos de optimización tácticos y operacionales de la logística urbana de mercancías.

A continuación se muestra la evolución que se ha dado en los modelos para la programación de la logística urbana de mercancías.

Por lo general la distribución de mercancías dentro de las ciudades se realiza en vehículos, pero algunas ciudades cuentan con infraestructura que hace posible la DUM por otros medios, por ejemplo Joborn et al (2004) trabaja la programación de trenes, basado en un modelo de economía a escala, de tal manera que se transporte la mayor cantidad de mercancía posible y reduciendo los viajes con carga desaprovechada. El objetivo del modelo es la minimización de costos, asignando a cada segmento entre estaciones, que es considerado un arc, un costo. Debido a las pocas opciones que se tienen, la elección de rutas no es compleja en el transporte de rieles, pero programar las horas de salida de los trenes sí lo es. El autor relaja el problema hallando la solución con la búsqueda Tabú y no con el método de branch and bound como comúnmente se hace, teniendo resultados positivos y más rápidos que con el método tradicional.

El modelo básico para la programación de rutas de vehículos es conocido como el Vehicle Routing Problem VRP, trabajado por primera vez por Dantzig y Ramser (1959) su objetivo es determinar la ruta en que se deben visitar los clientes, minimizando los costos de transporte teniendo en cuenta las restricciones de capacidad de carga del vehículo. El modelo considera a cada cliente un nodo, a los cuales se debe asignar una demanda y distancia entre ellos. La solución óptima del modelo se puede hallar con métodos matemáticos exactos, pero muchos autores prefieren trabajar con algoritmos heurísticos o

meta heurísticos para hallar soluciones reales cercanas al valor óptimo.

A partir de este problema se han cambiado y agregado variables a los modelos de ruteo para un resultado en la programación de operaciones más acertado. Las primeras modificaciones que se hicieron fueron con la intención de mejorar el uso que se le daba a la capacidad de los vehículos para realizar una distribución de mercancías más efectiva o de la infraestructura disponible, pues es imposible llevarle el paso al aumento de vehículos que se da en las vías.

4.2.1 Modelos de programación para optimización de la capacidad.

Shah et al (2011) proponen un modelo para mejorar el uso que se le da a la infraestructura disponible, haciendo máximo provecho de su capacidad. El problema se modela con programación entera, haciendo una maya de las vías disponibles para el transporte de mercancías, estas vías se agrupa en pequeños grupos formado diferentes “pelotones”, para cada pelotón se debe conocer su tiempo de recorrido y tiempo de posibles esperas en intersecciones. El modelo tiene dos formas: el Fixed platoon que calcula el tiempo de ejecución según velocidades esperadas y el Fixed period que se halla calculando promedios de tiempos reales.

La solución óptima se puede hallar con el método solver del software CPLEX, sin embargo el autor propone el algoritmo fixed platoon length variable period algorithm porque es posible trabajar problemas más grandes. La heurística desarrollada por el autor, escoge los “pelotones” con menor tiempo de recorrido, evitando que se aglomeren los vehículos en las intersecciones durante la distribución, mejorando así el uso de la infraestructura disponible. El planeamiento con fixed platoon reduce los tiempos de espera, mientras que el fixed period da un menor tiempo total.

Por otro lado Kirlik y Sipahioglu (2012) , que agregan al modelo los recorridos que hace el vehículo con carga vacía, esto con el fin de disminuir la distancia recorrida en la que se desaprovecha la carga del vehículo. El autor no usa el modelo de nodos para el ruteo sino por arcos (arc-routing problema). Este problema agrupa los clientes que se deben visitar en segmentos denominados arcs, la búsqueda tabú es el método más usado para escoger los segmentos que presenten la menor distancia, pero se han desarrollado múltiples métodos para su solución

como la búsqueda Tabú determinística, algoritmo memético y la optimización de colonia de hormigas entre otros.

El modelo conocido como CARPDD (Capacitated arc-routing problema with deadheading demands) es un problema lineal entero y se propone la heurística de Ulusoy Partitioning para su solución, esta tiene dos fases, la primera forma la red de segmentos disponibles para hacer los recorridos y la segunda las rutas de menor distancia, para esta segunda fase el autor describe la complejidad de cuatro algoritmos que pueden ser usados (CCP, RPP, CHORTEM Y CONSTRUCTION). Además para garantizar un resultado óptimo se exponen 2 algoritmos post-optimización que traen mejoras de hasta el 12% en los resultados de las rutas.

Con el mismo fin de disminuir el tiempo que los vehículos viajan solos, Behrens y Picard (2011) proponen un modelo económico para encontrar un equilibrio en la carga que debe tener la distribución de mercancías para maximizar las ganancias de los productores, para esto se debe garantizar que la demanda vaya en ambas direcciones, y tener una cantidad mínima de mercancía de regreso para que se realice un recorrido.

El modelo encuentra el equilibrio con un coeficiente dado según la demanda y distribución de la ciudad, se contemplan ciudades “capitalistas” que tienen regiones homogéneas y la distribución se debe dar por toda la ciudad, y ciudades “capacitadas” donde los fabricantes o comerciantes de cierto tipo de producto se encuentran aglomerados. El modelo tiene la restricción que solo contempla el equilibrio para un solo tipo de producto, pues todo el equilibrio lo basa en datos económicos de las ciudades.

4.2.2 Modelos de programación para optimización de la cantidad de vehículos. La mayoría de VRP programa las rutas para un solo vehículo o para flotas homogéneas, sin embargo ciertas mercancías requieren vehículos con características específicas, por lo que Perrier, Langevin y Amaya (2008) trabajan un modelo basado en redes para múltiples productos, el modelo restringe algunas rutas para cierto tipo de vehículos y busca minimizar las distancias para todas las rutas. El autor propone dos métodos de optimización, uno es un algoritmo paralelo que divide el problema en sub-problemas y asigna las rutas para cada uno, el segundo método divide la red en grupos, cada uno con una demanda similar,

y asigna a cada nodo de la red un vehículo que pueda atender el nodo, y luego une los nodos para generar las rutas.

Para calcular la cantidad de vehículos óptima, Pureza, Morabito y Reimann (2011) se apoyan en la teoría que para cumplir con el tiempo en una distribución no necesariamente se deben aumentar la cantidad de vehículos, sino agregar trabajadores que hagan labores de carga y descarga reducirá en gran manera los tiempo totales de la ruta, permitiendo cumplir los requerimientos en más lugares con la misma cantidad de vehículos, el modelo propuesto VRPTWMD tiene tres variables, busca minimizar costos, distancias de la ruta y asignar la cantidad de empleados necesaria a cada vehículo. Se propone para su solución la búsqueda tabú y ACO ant colonization problem, con algoritmos que ya han sido probados para problemas similares con dos variables. Los resultados del modelo permiten ver una mejora en los tiempos de las rutas aumentando la fuerza laboral de los vehículos, sin embargo la reducción del tiempo por empleado está basado en suposiciones, para tener un resultado más verídico se deberían tomar tiempos reales para observar qué tanto afecta agregar un trabajador el tiempo de actividades de carga/descarga.

Otro modelo basado en carga laboral es el de Boonprasurt y Nathavanij (2012), cuyo modelo determina el tamaño de carga y rutas de entrega óptimas. El autor trabaja dos prototipos del modelo, el VRPMMH-FWA (vehicle route problem with manual materials handling with fixed work assignment) y el VRPMMH-FLW (vehicle route problem with manual materials handling with flexible work assignment). La diferencia es que el primer modelo trabaja con una cantidad de trabajadores fija, y el segundo asigna los trabajadores según la demanda, pero se plantean y se resuelven de la misma forma.

Para ambos modelos se debe conocer la capacidad de todos los vehículos, las distancias que hay entre la bodega y la demanda de los. El objetivo es disminuir los costos, que se considera que vienen del salario de los empleados y el combustible consumido. El problema se construye bajo el modelo matemático minsum y se halla la solución con una herramienta de optimización llamada LINGO. Ambos modelos dan resultados en las rutas similares, pero el FWA presenta una mejor distribución en la fuerza de trabajo.

La distribución de mercancías es considerada la “última milla” de la cadena logística, a pesar de esto la mayoría de modelos para la programación de la distribución no tienen en cuenta el funcionamiento de toda la cadena, por lo que Aized y Srai (2014) sugieren un modelo jerárquico de tres fases para la programación y planeación adecuada de la última milla de la cadena logística. La primera fase define la zona que será atendida, la segunda los vehículos necesarios para la distribución y la tercera las rutas, programadas con un modelo dinámico que permite modificarlas en caso que un vehículo se averíe.

4.2.3 Modelos de programación para optimización del backhaul. Yu y Dong (2013) formulan un modelo para optimizar las rutas de backhaul con un algoritmo genético basado en el backhaul VRP, para maximizar las ganancias sin violar la ventana de tiempo y capacidad del vehículo, que identifica primero las rutas de distribución para un solo vehículo y segundo la mejor programación para estas.

El manejo que requieren ciertos productos y regulaciones actuales de medio ambiente hace que compañías hoy día deban considerar su cadena logística de manera bidireccional, es decir entregar y recolectar mercancías en cierto punto, lo que hace más complejo el uso de la capacidad en la distribución de mercancías, muchas cadenas logísticas hacen aparte la entrega y la recolección de esta, sin embargo para una distribución más efectiva es mejor realizar la entrega y recolección de mercancía simultáneamente, este modelo es conocido como el Vehicle Routing Problem with Simultaneous Delivery and Pick ups (VRPSDP)

Lin et al (2014) desarrollan un modelo de optimización para el problema de ruteo con entrega y recolección simultánea (VRPSDP), con el fin de reducir costos ambientales y económicos. El modelo tiene dos variantes, en la primera el transportador recoge toda la mercancía que haya (full pick up) y la otra recoge lo que pueda según su capacidad de carga (partial pick up).

El modelo se estructura en 3 módulos, en el primero se hace la recolección de información como ubicación de clientes, demanda, capacidad y consumo de combustible de vehículos. Con la información recolectada, se formula el modelo, cuyo objetivo es la minimización de distancias, y se usa el algoritmo genético para hallar las mejores rutas. El tercer módulo agrega los otros

factores a tener en cuenta en el modelo, como el costo económico (especialmente consumo de gasolina y salario transportadores) y costos ambientales (emisión de CO₂), y a través de una comparación escoge las rutas con menor costo total. Según aplicaciones de este modelo, la modalidad full pick up presenta un menor costo total, aunque se recorran más distancias que en el partial pick up, además permite concluir que los vehículos muy grandes no resultan beneficiosos para la distribución de mercancías, desde un enfoque ambiental.

Ruan, Lin y Kawamura (2012) formulan un modelo para programar en forma de cadena las rutas con delivery and pick ups que un vehículo deba realizar en el día. Para el modelo se tienen en cuenta las rutas ya programadas, las características de los bienes transportados y los requerimientos operacionales de cada ruta. Se proponen 3 metodologías para modelar el problema: nested logit, mixed logit y multimodal logit. La programación por cadena de rutas se comparó con rutas individuales y se observó que el modelo con mejor desempeño en la reducción de costos es el multimodal logit, sin embargo este planteamiento tan general del problema de ruteo no tiene en cuenta muchos factores reales que afectan a cada ruta, por lo que se aconseja este tipo de modelo para entender ciertos comportamientos de la distribución de mercancía, mas no para la programación de rutas de distribución.

En situaciones reales no siempre es posible hacer la recolección de toda la mercancía demandada, por lo que se deben escoger según la capacidad de los vehículos disponibles, a cuales clientes hacer la recolección. Para esto Aras, Aksentev y Tekin (2010) formulan un modelo con programación lineal entera mixta, agregando un precio por servir a ciertos clientes, según los beneficios económicos (basado en distancias recorridas) que trae recoger mercancías en esos puntos, para hallar las rutas y los lugares donde se debe hacer entrega y recolección se usa un método heurístico basado en la búsqueda tabú. Gribkovskaia, Laporte y Shyshou (2008) aplicaron anteriormente este mismo modelo para el problema de recolección de botellas de plástico reciclables, y sugiere otro algoritmo basado también en la búsqueda tabú con resultados muy cercanos al óptimo.

4.2.4 Modelos de programación con variables estocásticas. Tricoire, Graf y Gutjahr (2011)

presentan un modelo estocástico bi-objetivo con el fin de disminuir los costos de transporte y minimizar el porcentaje de demanda sin suplir. Se considera un problema estocástico porque a la demanda se asignan variables aleatorias, por la incertidumbre que presenta este dato. Para minimizar la demanda insatisfecha, en cada centro de distribución se identifican cuantos clientes no se van a suplir porque no están cerca o por falta de capacidad en los vehículos. El modelo determina a cuales centros de distribución suplir y en qué orden, hallando soluciones de Pareto, es decir que se pueden cambiar el resultado óptimo de un objetivo sin afectar el otro, con una metodología heurística basada en el epsilon-constrain (ECM).

Chen et al (2009) proponen dos modelos probabilísticos basados en la idea que si se trazan rutas para largos periodos de tiempo, estas se vuelven más eficientes, pues hay más familiaridad con estas y propone dos modelos de arc-routing teniendo en cuenta la probabilidad de visitar ciertos segmentos en determinado periodo de tiempo. El primer modelo (PARM) asigna a cada segmento una probabilidad de ser visitado según datos históricos, y el segundo (MARM) la probabilidad de los segmentos de ser visitados según el día de la semana. La solución de ambos modelos se halla con el método de búsqueda local. El modelo MARM es más útil pues da rutas para cada día, que se apegan más a la realidad de la demanda, además aunque organizar la información para encontrar la probabilidad diaria puede ser complejo, encontrar su solución es más rápido.

Zhang y Chaovallitwongse (2011) brindan un resumen de la evolución que ha tenido el VRP con variables estocásticas, a partir de estos cambios genera un modelo VRPSPD con el tiempo de recorrido como una variable estocástica. Para su solución el autor compara los resultados de la búsqueda dispersa (Scatter search) con los del algoritmo genético que es la metodología comúnmente usada para este tipo de problemas, concluyendo que la búsqueda dispersa es más flexible para problemas combinatorios y da mejores soluciones.

Ghannadpour , Noori y Tavakkoli (2013) dan un resumen de la evolución de modelos VRP con variables fuzzy, y formula un modelo dinámico multiobjetivo, considerando el tiempo que se demoran los recorridos y satisfacción del cliente variables con distribución fuzzy. El modelo busca optimizar la cantidad de vehículos, y rutas

minimizando la distancia y tiempos de recorrido, y maximizar el nivel de satisfacción de los clientes entregando la mercancía a la hora más adecuada. La distribución de variables fuzzy se calcula con datos históricos. Su solución se halla con 3 módulos siguiendo la metodología del algoritmo genético, y con la ayuda de dos algoritmos desarrollados por el autor para poder modificar las rutas en tiempo real según la nueva demanda de mercancía que se genere durante la distribución. Pocos modelos multiobjetivos se han desarrollado para el VRP, el desempeño de este modelo comparado con otros con un solo objetivo o bi-objetivo presentan poca diferencia en las rutas, simplemente este trae una mayor satisfacción de los clientes.

4.2.5 Modelos de programación dinámicos. El uso de variables estocásticas aumentan la probabilidad de tomar un decisión acertada, sin embargo es imposible conocer con exactitud cómo se van a presentar situaciones del tráfico o de la demanda, que tienen un alto nivel de incidencia en la DUM, por lo que se hizo necesario agregar al problema un factor dinámico. Avances en las tecnologías de información han resultado valiosos para tratar el problema de ruteo de manera dinámica dando lugar a modelos que tienen en cuenta las variaciones en tiempo real que se pueden presentar durante la distribución de mercancías, estos son conocidos como DVRP (dynamic vehicle routing problem).

Hu y Sheng (2013) tienen un modelo que se considera dinámico, que optimiza la asignación de bienes cada vez que se haga una entrega o se recoge mercancía, el modelo trabaja la asignación de bienes a los vehículos con el fin de minimizar los índices de carga vacía. El modelo holístico integra comportamiento de transportadores, características de bienes, capacidad de carga de vehículo y asignación de rutas con programación multiobjetivo lineal entera mixta.

El autor desarrolla 3 algoritmos, uno para generar el mapa con las posibles rutas para la distribución en la ciudad con sus respectivas distancias, otro para asignar de manera óptima los bienes a cada vehículo mediante una matriz de carga, y un tercero para que se realice el recorrido cumpliendo una ventana de tiempo, recorriendo la menor distancia posible, haciendo una comparación con matrices de distancia y de tiempo.

El modelo dinámico de Yan, Lin y Lai (2013) permite ajustar las rutas de distribución durante

las operaciones, considerando también la demanda una variable dinámica. El modelo se desarrolla con una heurística de ajuste de variables de dos fases, en la primera se hace una planeación con la demanda que se tenga prevista, minimizando los costos, teniendo en cuenta un costo de penalización si no se satisface la demanda dentro del tiempo establecido. La segunda fase hace el ajuste en tiempo real con una metodología sistemática, las nuevas demandas tienen un costo de penalización más bajo y se calcula un índice de cambio de la ruta, que se minimiza con el fin de cambiar poco la ruta inicial. La solución se halla con el método CPLEX MIP, los resultados del modelo comparados con el modelo determinístico de ruteo con ventana de tiempo, presentan un mejor desempeño en situaciones reales.

Otra variable que debe ser considerada dinámica durante la DUM por su alto grado de incertidumbre es el tiempo de recorrido, Hsu y Lin (2013) crearon un sistema inteligente para solucionar el problema de ruteo de vehículos con límite de capacidad. El sistema inteligente se desarrolló a partir de un algoritmo híbrido con AIS (artificial immune systems) y el algoritmo genético. El modelo hace mutaciones, imitando el comportamiento del sistema inmune, seleccionando como posibles soluciones los cromosomas “antígenos” y descartando los cromosomas “anticuerpos”. Tecnologías como el GPS, EDI, ITS y GIS, son usadas para determinar los tiempos de distribución de manera dinámica.

Liao y Hu (2011) también tiene en cuenta las variaciones del tiempo en un modelo de asignación de rutas en tiempo real. El problema se trata en dos módulos, el primero se encarga de asignar la mercancía a los vehículos, mediante el método sweep, que agrupa nodos cercanos para un vehículo y después asigna el orden en que deben ser visitados. Esta información de rutas se almacena en un simulador, y mientras los vehículos hacen su recorrido, con dispositivos se recoge información del estado del tráfico, con esta se actualizan los tiempos en una matriz. En el segundo módulo se usa esta matriz para actualizar las rutas con el algoritmo de búsqueda Tabú. La aplicación de este modelo permite asegurar que evitar vías congestionadas sí mejora la calidad de las rutas y entre más clientes tenga que visitar un vehículo, más posibilidades de cambio de ruta tiene, lo que podrá traer mayores reducciones en el tiempo total de recorrido.

Los problemas de ruteo con ventana de tiempo también han sido trabajados de forma dinámica por Taniguchi y Shimamoto (2004) cambiando tiempo de viaje, para distribución con entrega y recolección simultánea, resuelto con algoritmo genético.

Mu et al (2010) tienen en cuenta los accidentes que se puedan presentar durante la distribución de mercancías y modela el problema si un vehículo es inmovilizado. El problema es conocido como Disrupted Capacitated Vehicle Routing Problem with Vehicle Breakdown (DCVRP-B). El objetivo del modelo es minimizar los vehículos usados para realizar las entregas que debía hacer el vehículo averiado y sus distancias recorridas. Para su solución el autor propone dos algoritmos metaheurísticos basados en la búsqueda Tabú. Mamasis, Minis y Dikas (2013) trabajan un modelo para el mismo problema, pero este supone que no hay vehículos de refuerzo en caso de averío, por lo que algunos clientes puedan quedar sin recibir su mercancía, el autor tiene en cuenta esto y asigna un orden de importancia a los clientes para que se entreguen los pedidos más urgentes, y propone un algoritmo heurístico llamado fast label que elige a cuáles clientes servir, con cual vehículo y de qué manera (es decir si debe volver a la bodega o distribuir desde donde está el vehículo averiado), minimizando los costos de distribución.

El ruteo dinámico también ha sido trabajado en problemas tan específicos como la programación de vehículos grandes en proyectos de construcción de infraestructura, los cuales generan un aumento en el tráfico de las ciudades, tráfico que se puede mitigar con una buena programación de trabajo. Lee (2009) desarrolló un modelo que busca reducir el impacto de los vehículos de carga pesada necesarios para la ejecución del proyecto en el tráfico y consta de dos partes: una simulación calculando el impacto de la programación en el tráfico y un algoritmo para encontrar la mejor programación. Para encontrar las diferentes posibilidades de programación se usa el algoritmo ACO (ant colony optimization) que determina el nuevo flujo del tráfico basado en el principio que el comportamiento de las hormigas y los humanos son iguales, y las nuevas rutas se van a dar según el camino que escoja la mayoría de vehículos. Las diferentes programaciones posibles se simulan en el software y se selecciona la que de menor aumento del tráfico. La aplicación del modelo en la vida real deja ver que una buena programación de trabajo

de vehículos de carga pesada reduce en gran porcentaje el tráfico generado por estos y que asignar más trabajadores de los necesarios a un proyecto puede hacer que este termine más rápido, pero genera más tráfico.

En el futuro se espera que los vehículos sean automatizados, por lo que debe haber una programación y ruteo sincronizado perfectamente para evitar accidentes, por esto Giridhar y Krumar (2009) formulan un modelo para la reasignación de una programación para tráfico automatizado que puede ser usado en tiempo real y necesita pocas rutas conocidas en el futuro para hacer la programación, de tal forma que se haga la entrega de la mercancía en el menor tiempo posible, evitando generar tráfico.

El modelo estudia el flujo de vehículos de manera micro y es discreto en tiempo y espacio, para su desarrollo se debe hacer un mapa de las diferentes vías que van a usar las rutas, y la programación se hace con ayuda de un algoritmo polinomial subóptimo de tiempo, el cual según las rutas a cumplir va seleccionando los caminos a usar, escogiendo los de menor distancia primero. El algoritmo da una solución óptima local, que por lo general es la misma óptima global. El modelo permite realizar cambios que se presenten en las rutas de distribución. La principal falla del modelo es que trabaja con suposiciones en las velocidades que los vehículos van a tener en las calles, lo cual es un dato muy incierto y puede traer grandes variaciones en los tiempos de la distribución.

Muchos modelos y algoritmos para problemas de ruteo dinámico no son flexibles en situaciones reales, por lo que a pesar de tener información en tiempo real no se obtienen buenos resultados, por esto Hu, Sun y Liu (2012) sugieren una metodología de modelado basada en conocimiento. El problema debe ser analizado en el momento que cambie la demanda o los tiempos por expertos en programación y con su conocimiento plantear el problema con un procedimiento que propone el autor por módulos para desarrollar un modelo y algoritmos basados en un algoritmo genético que se ajusten a cada problema específico. La metodología propuesta es para VRP dinámico con ventana de tiempo, y busca cambiar lo menos posible la ruta inicial. Agregar el análisis de expertos al momento de reprogramar las rutas mejora los resultados hasta en un 40%, pues se da un mejor manejo al problema.

4.2.6 Modelos de programación verdes. Debido a los impactos ambientales que tiene el transporte, se agrega un factor ambiental a los modelos de ruteo de la DUM. Ericsson, Larsson y Brundell (2006) fueron de los primeros autores en preocuparse por la emisión de gases contaminantes en la distribución de mercancía, su estudio dirigido a estimar el efecto que herramientas de navegación e información en tiempo real tienen en la reducción de consumo de gasolina, dio pie a múltiples investigaciones en el tema. El estudio compara los resultados de modelos que buscan minimizar tiempo, distancia o combustible y permite ver que el camino más corto no siempre es el que menos combustible consume, y que un modelo con objetivo de minimizar el consumo de combustible puede llegar a ahorrar tiempo en el recorrido.

Ando y Taniguchi (2006) hacen un primer esfuerzo por medir la emisión de gases en el ruteo de vehículos, en un problema con ventanas de tiempo probabilísticas, el modelo se basa en datos históricos de las vías para hallar las probabilidades de la velocidad que se va a presentar en el camino, y partir de estas pronosticar el tiempo que se va a demorar su recorrido. Usa el algoritmo genético para hallar la hora de salida y orden de visitas a los clientes de los vehículos. Aunque en el planteamiento del modelo no tiene en cuenta las emisiones como un factor a disminuir, sí hace un análisis de como las velocidades que llevan los vehículos transportadores impactan en la emisión de gases contaminantes.

Belkas y Laporte (2011) agregan al modelo de ruteo la medición de la emisión de gases contaminantes en las rutas de la distribución de mercancías. El modelo llamado pollution routing problem PRP busca disminuir los costos operacionales y la emisión de gases de efecto invernadero. Se escogieron estos dos costos pues son los que mayor impacto tienen al momento de escoger las rutas, los costos de emisión se calculan basados en características del motor del vehículo, uso de aire acondicionado, velocidad (se asume la velocidad a la que pueden andar los vehículos en una vía según regulaciones) peso del vehículo y de la mercancía transportada. Aunque el modelo no es lineal, se usan restricciones que lo convierten en un problema de programación entera lineal, permite ser planteado con ventanas de tiempo o sin estas. La evaluación del modelo permite ver que a veces una menor distancia recorrida implica un mayor consumo de energía.

Otro modelo de emisión de gases es propuesto por Bing et al (2014) , el planteamiento tiene en cuenta costos de mano de obra, distancias y emisión de vehículos. El costo de la emisión se calcula por la velocidad que se espera que tengan los vehículos en cada segmento y características del vehículo. La solución óptima del problema se halla con programación entera mixta, pero se usan la búsqueda tabú para encontrar una solución factible, con el algoritmo cross-exchange. Pruebas del modelo dejan ver una reducción de la emisión de gases contaminantes del 7%.

Ma et al (2012) hacen una evaluación para la factibilidad de aplicar modelos de emisión microscópica en diferentes ciudades. El autor hizo la calibración en dos ciudades de China, usando el sistema de medidas de emisión portátiles PEMS, ampliamente usado por la veracidad de la información recolectada. La calibración se realizó para los modelos CMEM, VT-MICRO, EMIT y POLY, los cuales se basan en la capacidad de carga, velocidad del vehículo, motor y modelo del vehículo respectivamente, para calcular la emisión de gases de los vehículos. La calibración de los modelos se hizo con regresiones lineales en MATLAB y una validación con la media cuadrática. La comparación de los resultados de los modelos se realizó con el CMEM, que es el más usado y se concluyó que el VT-micro es el que logra una predicción más acertada, sin embargo aún falta información de ciertos vehículos, especialmente vehículos de gran tamaño, para obtener una predicción más verídica.

Bajo un modelo bi-objetivo con soluciones de Pareto y metodología ECM, Demir, Bektas y Laporte (2013) plantean los dos objetivos principales del problema disminuir el consumo de combustible y tiempo manejando, basado en la teoría que a mayor velocidad mayor consumo de gasolina, a pesar que se pueda llegar a más clientes. Para su solución el autor compara la ECM con otras tres metodologías (weight method, weight method with normalization, hybrid ECM & WM) para ver cuál presenta mejor desempeño. Concluyendo que el método híbrido es el que mejor se acopla al modelo.

Además de mejorar las rutas de distribución para disminuir la contaminación generada por el transporte de mercancías, se han hecho otros cambios como la compra de vehículos amigables con el medio ambiente, su adquisición representa una inversión considerable, que no es fácil de

hacer, pero necesaria en muchos casos por regulaciones gubernamentales.

Los modelos desarrollados para este tipo de vehículos son pocos, se encuentra el modelo de Cirovic, Pamucar y Bozanic (2014) que programa las rutas para una flota de vehículos mixta (amigables y no amigables con el medio ambiente), que distribuye la carga de la mejor manera, con el objetivo de disminuir la emisión de gases y de ruido, asignando a ambos parámetros una distribución fuzzy. Las rutas se encuentran con el algoritmo Clark Wright.

Las formas de energía para los vehículos amigables con el medio ambiente no son tan fáciles de conseguir como el combustible, por esto Erdo y Miller (2012) formulan un modelo con programación lineal entera mixta, para generar las rutas de distribución, selección del mejor punto para recargar el vehículo, teniendo en cuenta los recorridos que se deben hacer para recargar estos, minimizando el riesgo de quedarse sin energía. Para su solución el autor propone dos métodos basados en la heurística de ahorros de Clarke y Wright y el algoritmo Density-Based Clustering.

5. CONCLUSIONES

De los artículos analizados para el estado del arte se puede observar que la mayoría de modelos de optimización trabajados para solucionar el problema de la logística urbana de mercancías son modelos de ruteo de vehículos VRP. Si bien ya hay varios modelos de estos que incorporan las políticas que afectan la distribución de mercancías, como modelos VRPTW para el cumplimiento de horas valle, aún falta desarrollar modelos VRP que tengan en cuenta cambios que se han presentado en la distribución urbana de mercancías, especialmente generados por el cuidado del medio ambiente.

También se observa que la mayoría de métodos de solución usados para los modelos de optimización son metaheurísticas, este método es ampliamente empleado pues encuentra soluciones de alta calidad, que aunque no garantizan un resultado óptimo, son más factibles. Además estos métodos son flexibles, por lo que permiten ser adaptados para cada problema, usando información disponible y el análisis del modelo según la situación de cada ciudad en logística urbana de mercancías.

La predicción de la demanda de la DUM es un valor muy importante para la creación de políticas e infraestructura, debido a las diferentes características de cada ciudad es difícil aplicar o plantear un modelo que sirva para la predicción de la demanda de manera adecuada, por lo que es mejor realizar estudios a nivel micro en cada ciudad para estimar este valor, faltan metodologías y estudios de este tema en la literatura.

Debido al reciente uso incremental de vehículos amigables con el medio ambiente para la distribución urbana de mercancía, existe la necesidad de modelos de optimización para la localización de lugares para recargar o suministrar el combustible necesario para estos vehículos.

A partir del 2011 gracias a avances en las tecnologías de la información se hace común el uso de modelos VRP dinámicos, que permiten tener información acertada en tiempo real, lo que da mejores resultados en las rutas de distribución. Debido a los altos índices de contaminación que genera el transporte de mercancías, otro factor que sea tenido en cuenta en los últimos años en modelos de ruteo es el factor ambiental, que por lo general agregan un costo de penalización por emisión de ruido, gases o consumo de gasolina.

6. REFERENCIAS

AIZED, T. y SRAI, J. Hierarchical modelling of last mile logistic distribution system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. vol 70, pp. 1053-1061.

ALUMUR, S. y KARA, B. Network hub location problem: the state of the art. *European journal of operational research*. 2008. Vol 190, pp. 1-21.

ANAND, N., et al. GenCLON: an ontology for city logistics. *Expert systems with applications*. 2012. vol 39, pp. 11944-11960.

ANDO, N. y TANIGUCHI, E. Travel time reliability in vehicle routing and scheduling with time Windows. *Networks and spatial economics*. 2006. vol 6, pp.293-311.

ARAS, N.; AKSEN, D. Y TEKIN, M. Selective multi-depot vehicle routing problem with pricing. *Transportation research part C*. Agosto, 2010. vol 19, no 5, pp. 866-884.

AWASTHI, A.; CHAUAN, S. y GOYAL, S.K. A multicriteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. *Mathematical and computer modeling*. Julio, 2010. vol 53, pp. 98-109.

BELKAS, T. y LAPORTE, G. The pollution-routing problem. *Transportation research part B*. 2011. vol 45, pp. 1232-1250.

BEHRENS, K. y PICARD, P. Transportation, freight rates, and economic geography. *Journal of International Economics*. Junio, 2011. vol 85, pp. 280-291.

BING, X.; et al. Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic waste. *Waste management*. Febrero, 2014. vol 34, pp. 719-729.

BOONPRASURT, P. y NANTHAVANIJ, S. Optimal fleet size, delivery routes and workforce assignments for the vehicle routing problem with manual materials handling. *International Journal of Industrial Engineering*. 2012. vol 19, pp. 252-263.

BRAUERS, W.K.; et al. Multi objective decision making for road design. *Transport*. Junio, 2008. vol 23, no 3, pp. 183-193.

CHEN, Si, et al. Arc-routing models for small package local routing. *Transportation science*. Febrero, 2009. vol 43, no. 1, p. 43-55.

CIROVIC, G.; PAMUCAR, D. y BOZANIC, D. Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. *Expert systems with applications*. 2014. vol 41, pp 4245-4258.

DANTZIG, G., y RAMSER, J. The truck dispatching problem. *Management Science*. 1959, vol. 6, pp. 80-91.

DEMIR, E.; BEKTAS, T. y LAPORTE, G. The bi-objective pollution-routing problema. *European journal of operational research*. Agosto, 2013. vol 232, pp. 464-478.

ERDO, Sevgi y MILLER-HOOKS, Elise. A Green vehicle routing problem. *Transportation research part E: Logistics and transportation review*. Enero, 2012. Vol 48, pp. 100-114.

ERICSSON, E.; LARSSON, H. y BRUNDELL-FREIJ, K. Optimizing route choice for lowest fuel consumption – potential effects of a new driver support tool. *Transportation research part c*. 2006. vol 14, pp. 369-383.

GHANNADPOUR, S.; NOORI, S. y TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. multiobjective dynamic vehicle routing problema with fuzzy travel times and customers satisfaction in supply chain management. *Transactions on engineering management*. Noviembre, 2013. vol 60, no 4, pp. 777-790.

GENTILE, G. y VIGO, D. Movement generation and trip distribution for freight demand modelling applied to city logistic. *European transport*. 2013. vol 54, no 6, pp. 52-79.

- GIRIDHAR, A. y KRUMAR, P. R. Scheduling Automated Traffic on a Network of Roads. *IEEE transactions on vehicular technology*. Septiembre, 2006. vol 55, no 5, pp. 1467- 1474.
- GRIBKOVSKAIA, I.; LAPORTE, G. y SHYSHOU, A. The single vehicle routing problema with deliveries and selective pickups. *Computers & operations research*. Septiembre, 2008. vol 35, no. 9, pp. 2908–2924
- HOLGUIN-VERAS, J y THORSON, E. Trip Length Distributions in Commodity-Based and Trip-Based Freight Demand Modeling: Investigation of Relationships. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Enero, 2007. no 00-0910, pp. 37-48.
- HU, X; SUN, L. y LIU, L. A PAM approach to ahndling disruptions in real-time vehicle routing problema. *Decision support systems*. Diciembre, 2012. vol 54, pp.1380-1393.
- HU, Zhi-Hua y SHENG, Zhao-Han. A decision support system for public logistics information service management and optimization. *Decision support systems*. Diciembre, 2013. vol 59, pp.219-229.
- HSU, L.F.; HSU, C.C. y LIN, T.D. An intelligent artificial system: artificial immune based hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem. *applied mathematics & information sciences*. Octubre, 2013. vol 8, no. 3, pp. 1191-1200.
- IBEAS, A.; et al. Urban freight transport demand: transferability of survey results analysis and models. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2012. vol 54, pp. 1068-1079.
- INGLADA, L. y TEIXIDÓ, N. Ciudad y mercancías: logística urbana. Políticas de movilidad y soluciones de gestión de la logística urbana para las empresas y los organismos públicos. 2 ed. México: Alfaomega, 2013. pp 160.
- JOBORN, Martin; et al. Economies of scale in empty freight car distribution in cheduled railways. *Transportation science*. Mayo, 2004. vol 38, no. 2, pp. 121-134.
- KIRLIK, G y SIPAHOGLU, A. Capacited arc routing problema with deadheading demands. *Computers & operations research*. 2012. vol 39, pp. 2380-2394.
- LABBÉ, M., YAMAN, H. y GOURDIN, E., 2005. A branch and cut algorithm for the hub location problems with single assignment. *Mathematical Programming*. 2005. Vol 102, pp. 371–405.
- LEE, HY. Optimizing schedule for improving the traffic impact of work zone on roads. *Automation in Construction*. Mayo, 2009. vol 18, pp. 1034–1044.
- LIAO, T. y HU, T. An object-orientate evaluation framework for dynamic vehicle routing problems under real-time information. *Expert systems with applications*. 2011. vol 38, pp. 12548-12558.
- LIN, C, et al. A genetic algorithm-based optimization model for supporting Green transportation operations. *Exert systems with applications*. 2014. vol 41, pp.3284-3296
- LINDHOLM, M y BEHREND, S. Challenges in urban freight transport planning-a review in the Baltic sea region. *journal of transport geography*. 2012. vol 22, pp. 129-136
- MA, X; et al. An evaluation of microscopic emission models for traffic pollution simulation using on-board measurement. *Environmental model asses*. 2012. vol 17, pp. 375-387
- MAMASIS, K; MINIS, I y DIKAS, G. Managing vehicle breakdown incidents during urban distribution of a common product. *Journal of the Operational Research Society*. 2013. vol 64, pp. 925-937
- MARCUCCI, E y DANIELIS, R. The potential demand for a urban freight consolidation centre. transportation. Diciembre, 2013. vol 35, pp. 269-284.
- MOHAMMADI, M; TORABI, S Y TAVAKKOLI-MOGHADDAM. Sustainable hub location under mixed uncertainty. *Transportation research part E*. Diciembre, 2013. vol 62, pp 89-115.
- MEIDUTÉ, L. Economical evaluation of logistics centres establishment. *Transport*. Febrero, 2007. vol 22, no 2, pp. 111-117.
- MU, Q; et al. Disruption managementof the vehicle routing problem with vehicle breakdown *Journal of the Operational Research Society*. 2010. vol 64, no 4, pp. 742-749.
- NUZZOLO, A y COMI, A. Urban freight demand forecasting: A mixed quantity/delivery/vehicle-based model. *Transportation Research Part E*. 2014. vol 65, pp. 84-98.
- NUZZOLO, A; CRISALLI, U. and COMI, A. A delivery approach modeling for urban freight restocking. *Proceedings of the 12th International Conference on Travel Behaviour Research (IATBR)*, 10-15, junio, 2010. Lisbon, portugal. *Transportation research*
- O’KELLY, M. A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities. *European Journal of Operational Research*. 1987. Vol 32, pp. 393–404.
- OKELLY, M. Hub facility location with fixed costs. *Papers in Regional Science*. 1992. vol 71, pp. 293–306.
- OLSSON, J y WOXENIUS, J. Localisation of freight consolidation centres serving small road

- hauliers in a wider urban area: barriers for more efficient freight deliveries in Gothenburg. *Journal of transport Geography*. 2014. vol 34, pp. 25-33
- PERRIER, N.; LANGEVIN, A. y AMAYA, C. Vehicle Routing for Urban Snow plowing operations. *Transportation science*. Febrero, 2008. vol 42, no 1, pp. 44-56.
- PUREZA, V.; MORABITO, R. y REIMANN, M. Vehicle routing problem with mutiple deliverymen: modeling and heuristic approaches for the VRPTW. *European journal of operational research*. Diciembre, 2011. vol 218, pp.636-647.
- RUAN, M.; LIN, J. y KAWAMURA, K. Modeling urbean comercial vehicle daily tour chaining. *Transportation research part E*. Febrero, 2012. vol 48, pp. 1169-1184
- SHAH, N.; et al. Optimization models for assessing the peak capacity utilization of intelligent transportation systems. *European Journal of Operational Research*. Junio, 2011. vol 216, pp. 239-251.
- SKRINJAR, J.; ROGIE, K. y STANKOVIC, R. Location of urban logistic terminals as hub location problem. *Traffic&Transportation*. 2012. Vol. 24, No. 5, pp. 433-440
- TANIGUGHI, E y SHIMAMOTO, H. Intelligent transportation system based dynamic vehicle routing and scheduling with variable travel times. *Transportation research part C*. 2004, vol 12, pp. 235-250.
- TANIGUCHI, E. y THOMPSON, R. Modeling city logistics. *Transportation research record*. Enero, 2007. vol 1790, pp. 45-51.
- TOPCUOGLU, H. et al. Solving the uncapacitated hub location problem using genetic algorithms. *Computers & OR*. 2005. vol 32, pp. 967-984.
- TRICOIRE, F; GRAF, A. y GUTJAHR, W. The bi-objective stochastic covering tour problema. *Computers & operational research*. Septiembre, 2011. vol 39, pp. 1582-1592.
- YAN, S; LIN, JR y LAI, CW. The planning and real-time adjustment of courier routing and scheduling under stochastic travel times and demands. *Transportation research part E*. Enero, 2013. vol 53, pp. 34-48
- YAMADA, T; et al. Designing Multimodal Freight Transport Networks: A heuristic Approach and Applications. *Transportation science*. Mayo, 2009. vol 43, no 2, pp. 129-143
- YU, J y DONG, Y. Maximizing profit for vehicle routing under time and weight constraints. *International Journey of Production Economics*. Mayo, 2013. Vol 145, pp. 573-583.
- ZHANG, T; CHAOVALITWONGSE, W.A y ZHANG, Y. Scatter search for the stochastic travel-time vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. *Computers & operations research*. Diciembre, 2011. vol 39, pp. 2277-2290.