



**Optimización de la distribución de mercancías
utilizando un modelo genético
multiobjetivo de inventario colaborativo
de m proveedores con n clientes**

JULIAN ANDRES ZAPATA CORTES

**Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas,
Departamento de la Ingeniería de la Organización
Medellín, Colombia
2016**

**Optimización de la distribución de mercancías
utilizando un modelo genético multiobjetivo
de inventario colaborativo
de m proveedores con n clientes**

Julian Andres Zapata Cortes

Tesis doctoral como requisito parcial para optar al título de:

Doctor en Ingeniería – Industria y Organizaciones

Director:

Ph.D. Martín Darío Arango Serna

Doctor en Ingeniería Industrial

Línea de Investigación:

Gestión de la cadena de suministro

Grupo de Investigación:

Grupo de I+D+i Logística Industrial-Organizacional “GICO”

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de la Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

2016

Agradecimientos

A Dios, a mi familia, a mis amigos y a todas las personas que de una u otra forma me dieron su apoyo para la realización de esta tesis doctoral.

Resumen

Esta tesis doctoral presenta una propuesta para la optimización de la distribución de mercancías utilizando un modelo genético multiobjetivo de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes, basado en la estrategia del inventario manejado por el vendedor (VMI), el cual permite optimizar de manera simultánea los costos de transporte e inventario, el nivel de servicio en los clientes y el número de viajes requeridos por el sistema de distribución entre múltiples proveedores y clientes.

El modelo se desarrolla para la mejora del proceso de distribución de alimentos en la zona centro de la ciudad de Medellín, el cual una vez validado con las condiciones de la ciudad mediante simulación, permite optimizar de manera simultánea los tres objetivos propuestos en el modelo, con lo cual se puede mejorar el desempeño del proceso de distribución en la ciudad. De esta forma, este modelo es pertinente tanto para las empresas como para la ciudad, ya que considera elementos que velan por la rentabilidad de las compañías que colaboran (Costos y satisfacción de clientes) y aporta a la disminución del tráfico debido a un menor número de viajes requeridos, respectivamente.

El modelo genético multiobjetivo se basó en el algoritmo NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGAI), el cual es exitoso en la solución de problemas con múltiples funciones objetivos y es innovador en cuanto a su aplicación en la solución de problemas de distribución urbana de mercancías, por las funciones objetivo analizadas y por la representación y tratamiento de los individuos en el proceso interno del algoritmo genético. Mediante la formulación del modelo genético y su aplicación en la distribución urbana de mercancías, se cumplen totalmente los objetivos propuestos para esta tesis doctoral.

Palabras clave: inventarios colaborativos, optimización multiobjetivo, logística de ciudad, administración de la cadena de suministro, distribución de mercancías.

Abstract

This doctoral thesis presents a proposal for optimizing the distribution of goods using a multi-objective genetic model based on collaborative inventory for m suppliers with n customers, based on the Vendor managed inventory strategy (VMI). The model allows optimizing simultaneously the transportation y inventory costs, customers service level y the number of trips required by the distribution system among multiple suppliers y customers.

The model is developed to improve the process of food distribution in the center of the city of Medellin, y is validated with the conditions of the city through simulation, allowing to optimize simultaneously the three objectives proposed in the model, therefore it can improve the performance of the distribution process in the city. In this manner, this model is relevant both for companies y for the city, since it considers elements that improve the profitability of collaborating companies (Costs y customer satisfaction) y contributes to the reduction in traffic, due to a smaller number of travels required, respectively.

The multiobjective genetic model was based on the NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGAII), which is successful in solving problems with multiple objective functions y is innovative for its application in solving problems of urban freight distribution, the objective functions analyzed y the representation y treatment of individuals in the internal process of the genetic algorithm. Through the genetic model formulation the y its validation in the urban freight distribution process, the objectives of this doctoral thesis are fully accomplished.

Keywords: collaborative inventory, multi-objective optimization, city logistics, supply chain management, goods distribution.

Contenido

I	Logística de ciudad y distribución urbana de mercancías	19
1.1	Distribución urbana de mercancías	23
1.1.1	Actores del proceso de distribución urbana de mercancías	27
1.2	Estrategias clásicas de distribución de mercancías	29
1.2.1	Plataformas logísticas de ciudad	33
1.3	Costos de distribución urbana de mercancía	35
1.4	Medidas del nivel de servicio aplicables a los procesos de distribución urbana	36
1.5	Manejo de la información en la distribución urbana de mercancías	38
1.5.1	Indicadores de calidad y eficiencia críticos a tener en cuenta en un sistema logístico de ciudad	40
1.6	Tendencias en los proceso de distribución urbana de mercancías.....	43
2	Colaboración en el proceso de distribución urbana de mercancías	45
2.1	Mecanismos y tipos de colaboración entre empresas	49
2.2	Tipos de colaboración en la cadena de suministro	53
2.2.1	Colaboración vertical	54
2.2.2	Colaboración horizontal	55
2.2.3	Otras Clasificaciones para los tipos de Colaboración.....	57
2.3	Trabajos de colaboración en logística y cadena de suministro.....	58
2.3.1	Trabajos de colaboración vertical en logística y cadenas de suministros.....	59
2.3.2	Trabajos de colaboración horizontal en logística y cadenas de suministros.....	60
2.4	Procesos de colaboración en el inventario	62
2.4.1	Estrategias y Mecanismos de Coordinación de inventarios	63
2.4.2	Colaboración en el inventario y el transporte	65
2.4.3	Modelos de colaboración de inventarios.....	66
2.5	Colaboración en los procesos de distribución urbana de mercancías	68
2.5.1	Consolidación de mercancías	70
2.5.2	Intercambio de recursos.....	71
2.5.3	Intercambio de Información	72
2.5.4	Otros tipos de colaboración.....	72
2.5.5	Colaboración en el manejo de inventario en los procesos de distribución urbana	73
2.5.6	Trabajos de colaboración en distribución urbana de mercancías.....	74

3	Modelo genético para la solución de problemas de optimización multiobjetivo ..	
		77
3.1	Optimización multiobjetivo	77
3.1.1	Técnicas de solución a problemas multiobjetivo	79
3.2	Algoritmo NSGAI para la solución del modelo propuesto.....	83
3.3	Modelo genético multiobjetivo de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes	85
3.3.1	Representación del Individuo (cromosomas) y generación de la población inicial ...	87
3.3.2	Operador de selección	88
3.3.3	Operador de cruce	89
3.3.4	Operador de mutación.....	90
3.3.5	Otros elementos del algoritmo NSGAI Propuesto.....	91
4	Formulación del modelo para la distribución urbana de mercancías basado en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes ..	93
4.1	Requerimientos para la estructuración de un modelo para la optimización de la distribución de mercancías basado en inventarios colaborativos de m proveedores y n clientes.....	94
4.1.1	Elementos desde el punto de vista estratégico	94
4.1.2	Elementos desde el punto de vista táctico.....	96
4.1.3	Elementos desde el punto de vista operativo.....	99
4.2	Modelo multicapa para la optimización de la distribución urbana de mercancías basado en inventarios colaborativos de m proveedores y n clientes	100
4.2.1	Capa 1. Nivel Estratégico.....	102
4.2.2	Capa 2. Nivel Táctico.....	102
4.2.3	Capa 3. Nivel operativo	104
4.2.4	Capa 4. Información y Seguimiento del modelo.....	105
4.3	Modelo operativo para la optimización de la distribución urbana de mercancías basado en inventarios colaborativos de m proveedores y n clientes	108
4.3.1	Funciones objetivo.....	112
4.3.2	Restricciones	113
4.3.3	Parámetros y variables del modelo	116
4.3.4	Formulación multiobjetivo	117

5	Aplicación del modelo genético multiobjetivo de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes en la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín.	121
5.1	Propuesta de integración para la distribución colaborativa de alimentos en la ciudad de Medellín	121
5.1.1	Características, parámetros de entrada y recursos del modelo genético multiobjetivo.	128
5.2	Aplicación del modelo	132
5.2.1	Proceso de coordinación para la aplicación del modelo	133
5.3	Resultados del modelo multiobjetivo	137
5.4	Comparación de los resultados con el proceso actual de distribución	153
6.	Conclusiones.....	159
6.1	Conclusiones.....	159
6.2	Futuras líneas de investigación	164
	Bibliografía.....	165

Contenido de Anexos

Anexo A:	Caracterización de la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín.....	193
	A.1. Selección de actores y productos.	195
	A.2. Elementos logísticos de la Distribución de alimentos en la ciudad de Medellín.....	197
Anexo B:	Relación de variables y elementos del modelo multicapa.	198
Anexo C:	Matriz de distancias.....	200
Anexo D:	Código de programación del modelo genético multiobjetivo.....	202
	D.1. Código clase principal.....	202
	D.2. Código algoritmo central	203

Lista de Figuras

Figura 1.	Retos y dificultades de la logística de ciudad.....	22
Figura 2.	Actividades clave en los niveles de decisión en distribución de mercancías.....	26
Figura 3.	Actores del proceso de Distribución Urbana de Mercancía (DUM).....	29
Figura 4.	Estrategias de distribución.	30
Figura 5.	Estrategias de distribución presentadas por Rushton (2010).	31
Figura 6.	Esquema de contratación típico en la distribución urbana de mercancías.	31
Figura 7.	Esquema de distribución de ciudad en dos niveles.	32
Figura 8.	Oportunidades en colaboración.	48
Figura 9.	Medidas de la calidad de problema multiobjetivo	79
Figura 10.	Procedimiento del algoritmo NSGA II.....	85
Figura 11.	Esquema del algoritmo NSGAI utilizado.....	86
Figura 12.	Cromosoma para resolver el modelo MO propuesto.....	87
Figura 13.	Representación del operador de cruce.....	89
Figura 14.	Representación del operador de mutación.....	91
Figura 15.	Estructura de modelización para procesos de logística de ciudad.....	101
Figura 17.	Modelo colaborativo y de transferencia de mandato del VMI.....	109
Figura 18.	Zona de estudio para la propuesta de distribución colaborativa.....	122
Figura 19.	Relaciones entre los actores del último eslabón de la distribución de alimentos.	123
Figura 20.	Actores del proceso de distribución colaborativo propuesto.....	126
Figura 21.	Mapa de las posiciones de los proveedores y clientes marcados.	129
Figura 22.	Algoritmo para el cálculo de la matriz de costos.	132
Figura 23.	Esquema de asignación de inventario y transporte individual	134
Figura 24.	Esquema de asignación de inventario y transporte conjunta.....	136
Figura 25.	Individuo número 1 del conjunto de solución. Individuo de menor costo	139
Figura 26.	Individuo 14 del conjunto de solución. Individuo con el menor número de ventanas de tiempo incumplidas	140
Figura 27.	Comparación valores objetivo individuos 1, 14 y 7.	141
Figura 28.	Frontera Pareto y superficie conformada por las soluciones del problema.....	145
Figura 29.	Superficie formada con la extrapolación de los valores de las soluciones.....	145
Figura 30.	Fronteras Pareto desde cada par de funciones objetivos.....	147
Figura 31.	Variabilidad del valor las funciones objetivo en el total de los individuos.....	150
Figura 32.	Variabilidad de la cantidad de inventario asignado para los clientes 1, 12 y 21.	151
Figura 33.	Variabilidad de la cantidad de inventario en los clientes 1, 12 y 21.	152
Figura 34.	Distribución del inventario en los proveedores.	153
Figura 35.	Comparación resultados proceso actual con resultados del modelo multiobjetivo.	155
Figura A-1.	Esquema distribución ultimo nivel de distribución de alimentos.....	194

Lista de Tablas

Tabla 1.	Grupo de actores de Distribución de mercancías.	27
Tabla 2.	Medidas de nivel de servicio en el transporte de mercancías.....	37
Tabla 3.	Diferentes indicadores para logística de ciudad.....	40
Tabla 4.	Mecanismos de colaboración de acuerdo a los objetivos de colaboración.	52
Tabla 5.	Tipos de colaboración con respecto a los niveles de decisión.....	53
Tabla 6.	Clasificación de las técnicas de toma de decisión multicriterio	80
Tabla 7.	Tipos y formas de colaboración.....	97
Tabla 8.	Indicadores propuestos para el monitoreo del modelo.....	106
Tabla 9.	Elementos de las capas estratégica y táctica de la propuesta de distribución	127
Tabla 10.	Posición Geo referenciada de las posiciones de los clientes y los proveedores.	129
Tabla 11.	Demanda para cada uno de los clientes.....	130
Tabla 12.	Inventario inicial, inventario máximo y costos de inventario para cada cliente.	130
Tabla 13.	Ventanas de tiempo para atención de los clientes.	130
Tabla 14.	Ventanas de tiempo de atención a los clientes expresadas en minutos	131
Tabla 15.	Inventario inicial, costos de inventario y capacidad de producción de los proveedores. 131	
Tabla 16.	Matriz para asignar el inventario utilizando asignación individual de inventario y rutas. 135	
Tabla 17.	Matriz de asignación conjunta de inventario y rutas.	136
Tabla 18.	Mejores individuos obtenidos con el modelo genético multiobjetivo.	138
Tabla 19.	Comparación resultados producidos por los individuos 1 y 14.....	142
Tabla 20.	Inventario en los clientes y en los proveedores para el individuo 1.	142
Tabla 21.	Inventario en los clientes y en los proveedores para el individuo 14	143
Tabla 22.	Resultados simulación del proceso de distribución con condiciones actuales.	154
Tabla 23.	Costos de inventario, transporte y número de trayectos con las condiciones actuales. 154	
Tabla 24.	Indicadores de gestión para el monitoreo de la distribución colaborativa.....	156
Tabla 25.	Validación de las hipótesis de la investigación	163
Tabla A-1.	Actores de la cadena de suministro de alimentos.....	195
Tabla A-2.	Principales proveedores de los productos analizados.....	199
Tabla A-3.	Tiempos atención preferido por los clientes.....	199
Tabla B-1.	Elementos y fuentes de información para la etapa estratégica y táctica.....	202
Tabla B-2.	Relación de variables y fuentes de información para el modelo operativo.....	202

Introducción

La distribución urbana de mercancías se realiza en lo que se conoce como la última milla logística y tiene como finalidad llevar las mercancías a las instalaciones de los comerciantes o consumidores finales, ubicados al interior de las ciudades (Domínguez, 2013). La Distribución Urbana de Mercancías (DUM) es un proceso más complejo que aquel que se produce en entornos interurbanos, ya que requiere considerar las restricciones que se presentan por las dificultades de la movilidad en las ciudades, como es el caso de la infraestructura y las medidas establecidas en el marco de las políticas de transporte. Un proceso de transporte de carga ineficiente al interior de una ciudad genera múltiples inconvenientes como la congestión, el detrimento de la infraestructura, problemas de contaminación ambiental, ruido, accidentes, problemas de seguridad a transeúntes y otros usuarios, así como un aumento de los costos de distribución de las mercancías, pérdida de calidad en el servicio, entre otros inconvenientes directos para las empresas (Kuse *et al.*, 2010, Browne *et al.* 2012, Bouhouras y Basbas 2012).

Los procesos de distribución urbana se ven afectados por las condiciones y características propias de la red de distribución de las empresas, por las especificaciones de la infraestructura y por las políticas de las administraciones locales, con relación a las restricciones que estas imponen sobre los procesos de movilidad al interior de las ciudades (Ibeas, 2013). Otros elementos que condicionan la distribución urbana es la distribución espacial de la ciudad, las residencias, los servicios, etc. (Bozzo *et al.*, 2014). De la Fuente (2012) ha demostrado la influencia que la forma de una ciudad tiene en la movilidad urbana, lo que directamente afecta el transporte de carga al interior de las ciudades. Por su parte, Rushton (2010) sostiene que la distribución urbana de mercancías también se ve afectada por los diferentes momentos del día, como consecuencia de la existencia de franjas de tiempo en que el flujo de vehículos para el transporte de personas se incrementa (Horas Pico), accidentes, elementos culturales propios de la ciudad, etc.

Los procesos de transporte no deben detenerse, y cada vez más se deben realizar esfuerzos para mejorarlos, ya que estos procesos son cada vez más intensos, a causa de varios factores como el aumento del consumo de productos tecnológicos y patrones de distribución hasta los hogares (Ibeas *et al.*, 2012), además del incremento de restricciones para la movilidad de vehículos al interior de las ciudades, como condicionamientos ambientales y restricciones propias de movilidad en la ciudad para favorecer a los ciudadanos.

Hace más de dos décadas se han realizado esfuerzos por facilitar los procesos de distribución de mercancías al interior de las ciudades (Taniguchi, 2001; muñuzuri, 2003). A partir del año 2000, en la Unión Europea se han venido desarrollado múltiples iniciativas que buscan mejorar los procesos de distribución urbana de mercancías y generar un marco de referencia para la aplicación de buenas prácticas en esta materia. Este es el caso de las iniciativas BESTUFT I, BESTUFS II, NICHES, CIVITAS, SUGAR y TURBOLOG. Estas iniciativas han realizado esfuerzos para proponer documentos conceptuales alrededor de la distribución urbana de mercancías, analizar las mejores prácticas implementadas en diferentes ciudades del mundo y definir estrategias para mejorar dichos procesos, como es el caso de BESTUFS II (2008a), BESTUFS II (2008b), EUROPEAN COMMISSION (2013), CIVITAS (2010) y TURBLOG (2011).

Dentro de las estrategias de solución al problema de la distribución urbana de mercancías, la colaboración entre los actores del proceso de distribución es una de las alternativas más promisorias (Verlinde *et al.*, 2012). Múltiples trabajos académicos e investigativos mencionan la importancia de que los actores del proceso de distribución realicen esfuerzos colaborativos para mejorar el movimiento de mercancías en contextos urbanos (González-Feliu 2012, Lindholm 2014, Vieira *et al.*, 2015). Behrends *et al.* (2008) argumentan que debido a que el transporte es esencialmente una relación Negocio-Negocio, los modelos para resolver los problemas de distribución urbana de mercancía pueden funcionar mal sin un entendimiento y cooperación entre actores públicos y privados.

La colaboración entre actores de los procesos de transporte permite reducir los costos totales de los procesos de distribución y han demostrado producir buenos resultados en el contexto de la cadena de suministro. Aunque la meta más común en los procesos de transporte y distribución de mercancías es disminuir los costos del transporte, mediante la colaboración se pueden obtener beneficios como Incrementos en el servicio al cliente, acceso a tecnología

más avanzada y a mejor información (Cruijssen, 2006). Otros beneficios son mejor utilización de los vehículos, reducción de los costos de administración, incremento de los factores de carga, sincronización de los procesos de transporte (Hajdul, 2014), disminución del costo de inventario, del costo del procesamiento de pedidos (Vieira *et al.*, 2015), mejora en los niveles de servicio (BESTUFS II, 2008a) y beneficios ambientales, como la reducción de la emisión de contaminantes químicos (Lin y Ng, 2012), todos estos ocasionados al disminuir el número de viajes en el abastecimiento a los clientes de forma colaborativa.

La colaboración para coordinar las decisiones en el manejo del inventario entre varias empresas es una alternativa que ofrece efectos positivos (Won *et al.*, 2014; Bertazzi y Esperanza 2013). En este sentido Moin *et al.* (2011) mencionan que la integración de las decisiones sobre el manejo del inventario y el transporte son un elemento clave para mejorar el desempeño en la cadena de suministro. La estrategia más utilizada para realizar esta integración es el inventario manejado por el vendedor (VMI), el cual es una de las principales alternativas para la colaboración en los procesos de distribución de mercancías (González-Feliu *et al.*, 2010). Los procesos de distribución de mercancías en entornos urbanos implican la interacción de múltiples variables, nodos y restricciones, que hacen necesario utilizar modelos matemáticos complejos para poder encontrar solución al problema de optimización de estas redes. Además, intervienen varios factores que determinan su desempeño, como es el caso de los costos de operación, el nivel de servicio, la contaminación ambiental, la fiabilidad de la operación, etc., lo cual es evidente en los procesos de distribución urbana debido a la interacción cercana entre otros actores. En la Distribución urbana de mercancías además existe la necesidad de minimizar el número de viajes, pero sin afectar la economía de las empresas y los ciudadanos (Benjelloun *et al.*, 2010). Esto conlleva a que en los procesos de diseño de soluciones para el transporte sea necesario considerar varios objetivos o metas, los cuales generalmente son contradictorios uno del otro. Lo que implica la utilización de métodos de optimización multiobjetivo (Figueira *et al.*, 2005; Androutsopoulos y Zografos, 2010).

En esta tesis doctoral se desarrolla un modelo de optimización matemática multiobjetivo innovador para minimizar el número de viajes, los costos de transporte, el inventario del sistema y maximizar el nivel de servicio en la distribución de mercancías, aplicado en la distribución urbana de alimentos en la Ciudad de Medellín, el cual fue resuelto utilizando un algoritmo genético multiobjetivo, con lo cual fue posible obtener un conjunto de soluciones

que logran optimizar de manera simultánea las funciones objetivo mencionadas, que al ser comparadas con el proceso de distribución actual, producen menores costos y número de viajes, así como mejoras en el nivel de servicio.

Como se puede evidenciar a partir de la lectura de este documento de tesis doctoral, se cumplen a total cabalidad los objetivos propuestos para la optimización de la distribución de mercancías utilizando un modelo genético multiobjetivo de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes. Para el cumplimiento del objetivo general, en primera instancia se analizaron las alternativas y estrategias de colaboración de inventario encontradas en estudios realizados en la literatura científica y en experiencias en el ámbito empresarial, luego se modeló el sistema de distribución de mercancías con inventarios colaborativos de m proveedores con n clientes y se propuso un modelo de optimización matemática multiobjetivo que permita minimizar el número de viajes, los costos de transporte, el inventario del sistema y maximizar el nivel de servicio. Una vez formulado el modelo se definió una metodología de solución al modelo de optimización multiobjetivo, usando algoritmos genéticos a partir del cual se propone el modelo genético multiobjetivo para la optimización de la distribución de mercancías mediante el de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes, el cual fue validado con la simulación de su aplicación en un sistema de logística de ciudad, que corresponde a la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín.

Para facilitar la lectura de este documento de tesis doctoral, se estructura en cinco capítulos: logística de ciudad y distribución urbana mercancías, Colaboración en el proceso de distribución urbana de mercancía, Modelo genético para la solución de problemas de optimización multiobjetivo, Formulación del modelo para la distribución urbana de mercancías basado en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes y Aplicación del modelo a la distribución de alimentos en la ciudad de medellín. Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones y líneas futuras de investigación que se podrían desarrollar como consecuencia de esta tesis doctoral. Al cuerpo del documento se adjunta un conjunto de anexos para soportar los contenidos.

I Logística de ciudad y distribución urbana de mercancías

Este capítulo presenta los principales elementos teóricos que permiten contextualizar los procesos de logística de ciudad y distribución urbana de mercancía, los cuales son relevantes en la presente tesis doctoral, debido a que el modelo multiobjetivo que se propone mas adelante busca mejorar este tipo de procesos. El capítulo contiene los elementos más relevantes encontrados en la literatura científica sobre la distribución urbana de mercancías, las estrategias clásicas para su ejecución, los elementos relacionados con los costos y las medidas del nivel de servicio, el manejo de la información y las tendencias en los procesos de distribución urbana de mercancías.

La teoría logística argumenta que una empresa debe entregar sus productos en el momento adecuado, en el lugar adecuado, en la cantidad adecuada y con el costo adecuado (Bowersox *et al.*, 2002; Ballou, 2004; Taylor *et al.*, 2008). Sin embargo, estos factores en muchas ocasiones se ven limitados por causas externas a las empresas, como es el caso de la política, la sociedad, la ciudad, un país, entre otros. La reducción de costos y la mejora de los niveles de servicio no dependen exclusivamente de las empresas, ya que el entorno geográfico que las rodea, las ciudades, juegan un papel determinante para dicho propósito. La configuración particular de cada ciudad tiene un impacto en los niveles de competitividad de las empresas, ya que la infraestructura y los planes de movilidad de carga al interior de estas afectan directamente los costos de distribución, rapidez, confiabilidad de entregas, así como otros factores asociados al servicio (Rodrigue y Dablanc, 2011).

El transporte en general es un factor esencial en la economía de un país y es fundamental para el desarrollo integral de las economías de las diferentes ciudades. El transporte de carga, es un eslabón en las operaciones logísticas, lo cual tiene implicaciones en el costo y competitividad de las empresas, pero también en la calidad de vida de las personas en contacto con dicho transporte. La complejidad de la logística de carga en las ciudades genera externalidades negativas para sus habitantes tales como: contaminación atmosférica, ruido y congestión.

La Logística de Ciudad (City Logistics) se refiere al proceso de gestión que busca reducir los problemas de tráfico de vehículos de carga a través de procesos que conlleven a la reducción del número de viajes de camiones en las ciudades, el cual tiene como fin asegurar la competitividad de las empresas y de la ciudad, permitiendo además la reducción de costos de distribución urbana de mercancías, los problemas de tráfico y los impactos ambientales asociados a la contaminación química y social, producto del movimiento de mercancías al interior de la zona urbana (ciudades) (Benjelloun *et al.*, 2010). Benjelloun *et al.* (2010) menciona que el principal objetivo de la logística de ciudad es mitigar los impactos negativos del transporte, pero es evidente los intereses económicos de las empresas para producir ganancias. Otros objetivos perseguidos en un sistema de logística de ciudad son eficiencia económica, eficiencia ambiental y eficiencia social.

Rodrigue y Dablanc (2011) mencionan que la congestión en las ciudades se convierte en un problema importante cuando el número de habitantes se encuentra alrededor del millón de personas. Sin embargo muchas ciudades pueden enfrentar los efectos negativos de la distribución urbana de mercancías en zonas determinadas, debido a que estos procesos de distribución se han intensificado, motivados por los siguientes elementos (Ehmke, 2012):

- Cambios en los conceptos de distribución, como resultado de procesos de centralización de la manufactura, la diversidad de los puntos de almacenamiento e incremento de las tiendas de grandes superficies (Ehmke, 2012).
- Prácticas de producción y distribución basados en bajos niveles de inventario y en el justo a tiempo, lo que modifica los patrones de almacenamiento, frecuencias de envíos, cantidades y especificaciones de los vehículos (Ehmke, 2012).

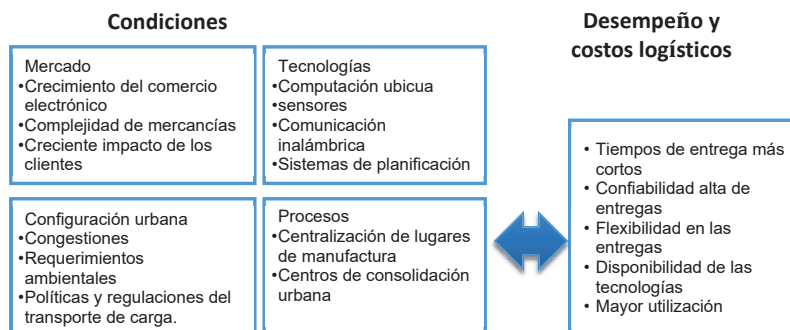
- Cambios en las estructuras de integración de las empresas en cadenas de suministro, generando procesos de planificación y control sobre múltiples eslabones de la cadena y generando el alcance hacia otros negocios y puntos de distribución (Ehmke, 2012).
- El éxito del comercio electrónico que genera procesos de distribución a los hogares y lugares de trabajo, suprimiendo la interacción de distribuidores e intensificando las operaciones de transporte (Ehmke, 2012).
- Cambios en prácticas de consumo y rápida obsolescencia de la tecnología.

Liu *et al.* (2008) establecen que “la única forma de evitar los efectos de la congestión de tráfico es reduciendo las distancias innecesarias de transporte”. Estos autores argumentan que un sistema de logística de ciudad ideal debe abarcar los siguientes requerimientos:

- Los procesos de transporte deben ser rápidos y estables.
- El sistema debe abarcar la totalidad del área urbana.
- La frecuencia del sistema debe ser suficiente para responder a la aleatoriedad de las entregas.
- El sistema debe aprovechar todos los recursos logísticos con que cuenta la ciudad.
- El sistema debe reducir los costos de operación y mejorar la eficiencia en el servicio.
- La operación del modelo de logística no debe producir efectos negativos en la ciudad.

Los procesos de logística de ciudad enfrentan múltiples retos de diferente índole, tal y como se muestra en la figura 1 (Ehmke, 2012).

Figura 1. Retos y dificultades de la logística de ciudad.



Fuente: Ehmke (2012).

A nivel internacional, existen múltiples iniciativas de logística de ciudad, que buscan mejorar los sistemas de movilidad de mercancía en las zonas urbanas, entre los que se encuentran:

- Magalhães (2010) presenta un enfoque de logística de ciudad para aumentar la capacidad de carga de camiones en la ciudad de Belo Horizonte en Brasil.
- Muñuzuri *et al.* (2005) presenta un resumen de las soluciones o iniciativas que pueden ser implementadas por administradores públicos, para mejorar el desempeño de sistema de transporte y los impactos ambientales del mismo en las ciudades, resaltando que el mejoramiento del sistema observado, se realiza desde el punto de vista de la comunidad y no del particular de las empresas.
- Russo y Comi (2010) presenta una clasificación de los estudios existentes con respecto a las políticas utilizadas para solucionar el problema de transporte urbano y de las medidas que se pueden tomar para evaluar dichas iniciativas.
- Tamagawa *et al.* (2010) presenta una metodología para evaluar las medidas de iniciativas de logística de ciudad, considerando el comportamiento de diferentes stakeholders, a través del uso de un modelo multiagente para dicho propósito.
- Muñuzuri *et al.* (2011) argumenta los factores que pueden entorpecer los procesos de logística de ciudad, a través del ejemplo de las estrategias establecidas en España, donde se destacan problemas relacionados con la morfología urbana, el comportamiento de los conductores, la falta de reglamentación legal y políticas obsoletas.
- Kuse *et al.* (2010) argumentan que los sistemas de logística de ciudad necesitan de un proceso de planificación adecuado que incluya elementos de infraestructura, así como las políticas de transporte en la ciudad.
- Taniguchi *et al.* (2010) presenta una revisión sobre como incorporar el riesgo en el modelamiento de los sistemas de logística de ciudad.
- Soriguera y Robusté (2011), Barcos *et al.* (2010) y Estrada *et al.* (2011) presentan diferentes estudios sobre modelamiento matemático y herramientas de optimización de redes y sistemas de transporte urbano, los cuales pueden ser utilizadas en los esquemas de logística de ciudad.

De acuerdo con Muñuzuri (2003), las soluciones para un sistema de movilidad urbana se enmarcan dentro de cuatro categorías (Muñuzuri, 2003): Soluciones de administración local: Aquellas desarrolladas por entes gubernamentales, como es el caso de la generación de normatividad y restricciones; Soluciones logísticas: Medidas tomadas por los transportadores para mejorar el desempeño logístico en el transporte de mercancía; Soluciones telemáticas: Aquellas relacionadas con la implementación de tecnologías de la información y las comunicaciones para mejorar el desempeño del sistema de movilidad de carga; y soluciones de marketing: Desarrolladas para generar un mercado para las soluciones logísticas y telemáticas.

1.1 Distribución urbana de mercancías

“La distribución urbana de mercancías engloba esencialmente los movimientos relacionados con la actividad comercial al interior de las ciudades. Incluye el transporte de mercancías con sus operaciones asociadas: entrega, recolección, transferencia, carga/descarga, colocación en puntos de venta, crossdocking con o sin almacenamiento transitorio para abastecimiento múltiple en centros de carga de pedidos, y retornos en logística inversa” (Antún, 2013). Domínguez (2013) hace énfasis en las actividades logísticas que deben tenerse en cuenta en los procesos de distribución urbana de mercancías, reforzando lo mencionado por Antún (2013), de la siguiente manera: “La logística urbana incluye operaciones físicas como la preparación de los pedidos, la consolidación de los envíos, el transporte (incluyendo las entregas a domicilio), almacenamiento de mercancías de corta o media duración, la gestión de puntos de recogida o entrega de la mercancía, y el retorno de los palés, los embalajes vacíos y los productos devueltos”.

El interés de las organizaciones por mantener el inventario en el nivel más bajo posible ha generado que las empresas aumenten las frecuencias de pedidos, lo cual incrementa el número de operaciones de transporte, carga y descarga. Adicional a esto, las estrategias comerciales para aumentar las ventas, ha llevado a un incremento en las referencias de los productos ofrecidos (productos de una misma clase con diferentes tamaños, ingredientes, colores, textura, etc.), lo que incrementa la cantidad de desplazamientos para abastecer una demanda pluralista y cambiante (Antún, 2013). En la misma línea, Deflorio et al (2012) argumentan que el incremento en la necesidad de satisfacer a los clientes y la competencia entre transportadores y empresas, son factores críticos que conllevan a que el elemento económico de la distribución urbana sea un factor determinante para su funcionamiento.

Son varias las dificultades enfrentadas en los procesos de distribución urbana de mercancías, de las cuales se pueden resaltar (Muñuzuri, 2003; Domínguez, 2013; Antun, 2013):

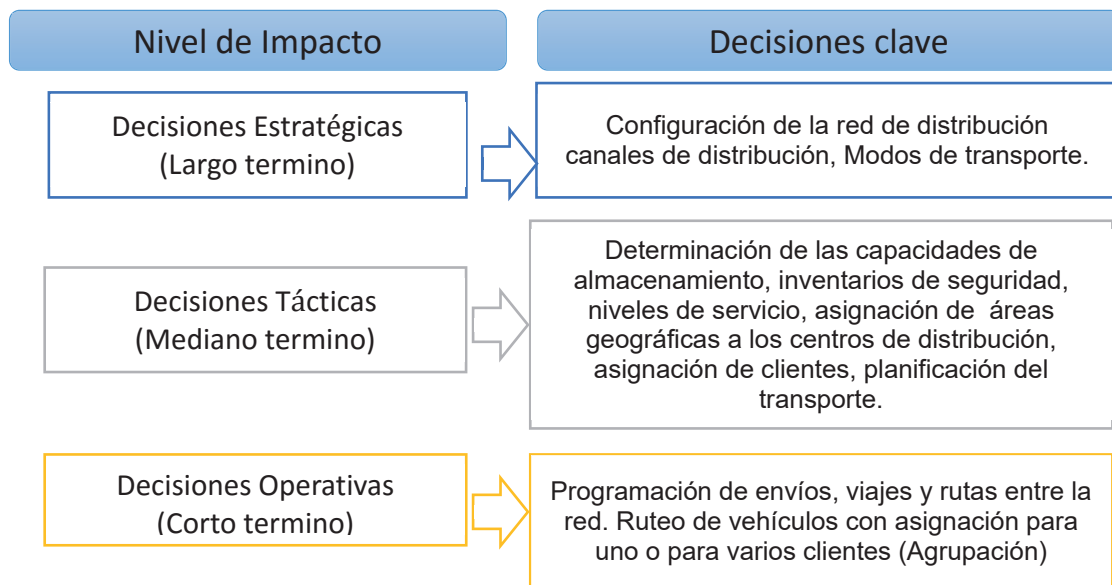
- La estructura física, la red vial y las restricciones de movimientos de camiones establecidas condicionan el movimiento de los vehículos al interior de las ciudades.
- Los originadores y los receptores de la mercancías no tienen las capacidades logísticas adecuadas, entorpeciendo las actividades de carga y descarga en zonas urbanas, dificultando los procesos de distribución (Antun, 2013).
- Los procesos de transporte realizados por las empresas no son eficientes, debido a que estas no son especialistas en los procesos de transporte.
- La infraestructura disponible en las ciudades es cada vez más reducida, debido al continuo incremento de vehículos, tanto para el transporte de personas como para mercancías.
- Debido a la falta de coordinación entre transportadores y clientes, es normal que sea necesario visitar más de una vez un cliente para poder completar las entregas exitosamente. Esta descoordinación se debe a ambas partes: los clientes acortan cada vez más las ventanas de tiempo para recibir las mercancías y los transportadores para responder a esto necesitan intensificar el transporte para cumplir con los pedidos, lo que hace que en ocasiones y por razones de falta de gestión del tiempo, no logren cumplir con las entregas en los tiempos establecidos (Domínguez, 2013).
- Muchos receptores de la mercancía no habilitan ni cumplen las ventanas de tiempo para atender a los transportadores, generando esperas para poder entregar las mercancías (Domínguez, 2013).
- Los transportadores no conocen bien la ubicación de sus clientes, dificultando llegar fácilmente a los puntos de destino, lo que perturba el cumplimiento de entregas a tiempo y el tráfico en las ciudades (Domínguez, 2013).
- Existe una gran variedad en tamaño y tipo de mercancías a distribuir, lo que hace que en ocasiones no se puedan combinar envíos y por tanto se produce una baja utilización de las capacidades de los vehículos y un aumento en el número de viajes.
- Existen ineficacias en el reparto y en la gestión medioambiental por parte de los transportadores, lo que ocasiona un aumento en los costos de distribución en ciudades (Domínguez, 2013).

- En determinadas áreas de una ciudad no existe suficiente densidad de clientes, lo que obliga que en ocasiones un vehículo deba viajar largas distancias para abastecer un único cliente, aumentando el número de viajes y produciendo ocupaciones de vehículos de tan solo entre el 40% y 50% (Domínguez, 2013).
- El reparto en las ciudades se realiza en mayor parte en vehículos como furgonetas o camiones con ocupaciones inferiores al 80% (Domínguez, 2013).
- El abastecimiento de los clientes requiere de espacios de parqueo para realizar operaciones de carga y descarga, incrementando la congestión en las zonas urbanas. Estas zonas son cada vez más reducidas, dificultado aún más el proceso de abastecimiento a los clientes en las ciudades (Muñuzuri, 2003).
- Muchas ciudades no disponen en cantidad y calidad de zonas adecuadas para la carga y descarga, lo que es necesario para el correcto funcionamiento de la operación de distribución de mercancías (Domínguez, 2013).
- Existen cada vez más presiones por parte de la ciudadanía para que se disminuyan los procesos de distribución urbana, buscando reducir la contaminación física, química y visual ocasionada por los procesos de distribución al interior de las ciudades.
- Existe falta de coordinación entre los diferentes actores que intervienen en la distribución urbana de mercancías.
- Las empresas receptoras de la mercancía solo se preocupan por recibir sus productos y lo mismo pasa con los proveedores, lo que dificulta la integración de las partes para intentar reducir los envíos y los costos de la distribución urbana de mercancías.
- Aunque existe una buena proporción de viajes que recogen y reciben mercancía (round Trips), alrededor del 60% al 65% de los viajes presentan ocupaciones de los vehículos con tan solo el 25% o 30% de su capacidad (Domínguez, 2013).
- La cantidad de mercancías a distribuir al interior de las ciudades presenta un comportamiento tendiente a aumentar, generando mayores procesos de transporte.
- Tendencias como tecnologías modernas que acortan los ciclos de producción, el crecimiento de las compras online y el reparto Justo a Tiempo, producen un incremento en las frecuencias de los envíos con tamaños reducidos (Domínguez, 2013).

- Muchos transportadores no utilizan tecnologías de la información y las comunicaciones en sus procesos, por lo que no pueden mejorar sus rutas en tiempo real, sin evitar atascamientos o cierres viales (Taniguchi *et al.*, 2001b).

Hendriks (2009) menciona que existen tres niveles de decisión relacionados con redes logísticas. Nivel estratégico, Nivel Táctico y nivel operacional. Con relación al diseño de redes logísticas: el nivel estratégico se encarga de decidir sobre el número, tamaño y ubicación de los nodos; a nivel táctico se requiere tomar decisiones sobre el diseño de las rutas, distribución interna de los nodos y la ubicación de recursos y productos en las instalaciones; El nivel operacional se encarga de las decisiones de corto plazo, es decir aquellas que tienen que ver con las operaciones diarias, como el ruteo, la programación de vehículos y el mantenimiento de instalaciones. La figura 2 relaciona los niveles de toma de decisiones y las actividades clave en cada uno de estos.

Figura 2. Actividades clave en los niveles de decisión en distribución de mercancías



Fuente: Bindi (2010).

La planificación y administración de los procesos de distribución son tareas complejas ya que requieren considerar un amplio número de actividades, decisiones y objetivos a perseguir (como es el caso de la reducción de costos y asegurar el nivel de servicio).

1.1.1 Actores del proceso de distribución urbana de mercancías

Taniguchi (2001) presenta los actores alrededor del problema de la distribución urbana de mercancías, clasificándolos en 4 grupos: Originadores de las mercancías, transportadores, residentes de la ciudad y administradores locales. Los originadores son las empresas que envían o reciben la mercancía y pueden ser empresas manufactureras, vendedores mayoristas, minoristas, almacenes de cadena, etc.; los transportadores, como su nombre lo indica, son las empresas, o partes de las empresas, que se encargan de mover la mercancía desde el origen a su destino; los residentes son las personas que viven o transitan la ciudad, que pueden ser los clientes finales de los productos o grupos de personas que se ven afectados y generan condicionamientos al transporte de carga; los administradores locales son las autoridades competentes, de orden nacional, regional o local, que regulan, condicionan, impulsan o vigilan los procesos de transporte al interior de las ciudades.

Antún (2013) agrupa los actores de los procesos de logística de ciudad también en cuatro grupos, tal y como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Grupo de actores de Distribución de mercancías.

Grupo	Actores
Prestadores de servicios logísticos	Operadores logísticos
	Distribuidores
	Productores
	Empresas de paquetería, correo, etc.
	Minoristas que producen sus propios medios de transporte.
	Agentes proveedores (comerciantes) que producen sus propios medios de transporte.
Demandantes de servicios logísticos	Establecimientos comerciales.
	Establecimientos empresariales industriales.
	Empresas de comercio electrónico (incluyendo tele compras).
Administradores locales	Administradores de la ciudad
	Policía u otras fuerzas reguladores del tránsito.
Otros	Juristas
	Ciudadanía
	Usuarios

Fuente: Antún (2013).

Deflorio *et al.* (2012) incluye otros actores que complementan la clasificación de Antún (2013), los cuales son: administradores del transporte, conductores, grupos de pequeños transportadores y asociaciones comerciales. Domínguez (2013) establece que los actores del proceso de distribución urbana de mercancías son los productores, generadores, receptores, consolidadores de la carga, centros de distribución, terminales intermodales, transportistas (públicos, privados, por contrato y especiales), la comunidad, encargados del mantenimiento de las vías, alcandías y autoridades locales y nacionales.

Con base en las clasificaciones de los actores mencionados anteriormente, la Figura 3 presenta una propuesta integradora de los actores, similar a lo presentado por Bowersox *et al.* (2002) para la clasificación de los actores en los procesos de transporte.

Figura 3. Actores del proceso de Distribución Urbana de Mercancía (DUM).



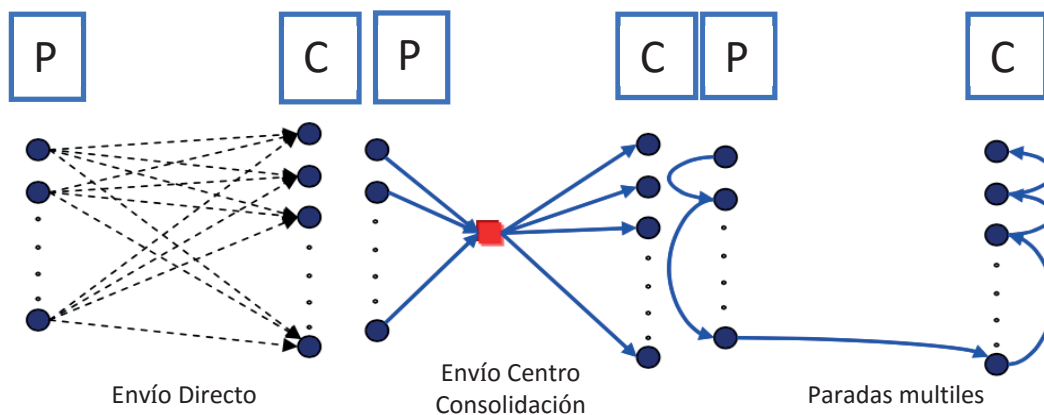
Fuente: Elaboración propia.

1.2 Estrategias clásicas de distribución de mercancías

Los procesos de distribución se desarrollan para entregar los productos a los clientes ubicados al interior de la ciudad, generando redes de transporte que son específicas de acuerdo a la cadena de suministros a la que pertenezcan. Morganti y Dablanc (2014) mencionan que las principales cadenas de suministro que se encuentran involucradas en los procesos de distribución de ciudades son siete: Almacenes de cadenas independientes, cadenas de tiendas y centros comerciales, cadenas de alimentos, paquetería y servicios de transporte especiales, entregas a hogares (mercado electrónico), empresas de construcción, y empresas para la recolección y disposición de residuos. Si bien por las características particulares de las ciudades es posible encontrar procesos de transporte con mercancías que solo atraviesan las ciudades (vehículos de paso), estos procesos, así como aquellos en los que las personas particulares visitan tiendas y/o almacenes para adquirir los productos que necesitan, no son tenidos en cuenta dentro de este estudio de los procesos de distribución urbana de mercancías.

En ciudades las mercancías pueden ser distribuidas utilizando diferentes estrategias, como enviar los productos de forma directa desde los proveedores hasta los clientes, pasar por una plataforma de consolidación/desconsolidación o puede consolidarse las mercancías de múltiples proveedores en un único vehículo, siguiendo la estrategia de paradas múltiples (Estrada 2007). Estas estrategias son mostradas en la Figura 4 y para cada caso, las mercancía pueden ser distribuidas utilizando la red de la empresa originadora, receptora, o puede realizarse mediante la subcontratación de una empresa de transporte externa (Verlinde *et al.*, 2012).

Figura 4. Estrategias de distribución.

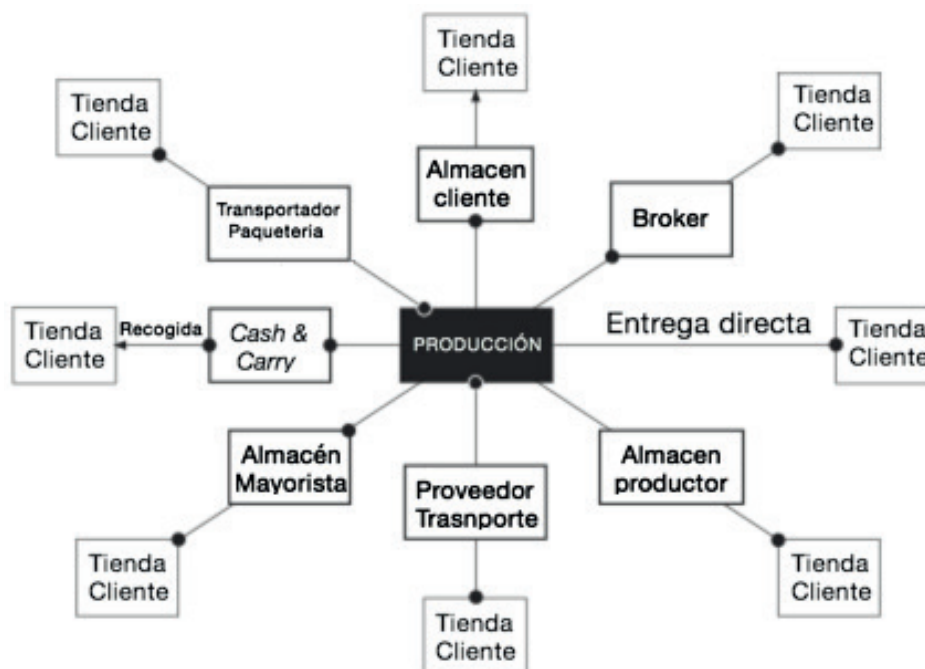


Fuente: Adaptado de Estrada (2007).

Los envíos directos se refieren al transporte de mercancía en un vehículo que tiene como destino un único cliente. Esta estrategia es adecuada cuando la utilización del vehículo es muy alta o total. Esta estrategia puede ser implementada para varios puntos de origen y varios puntos de destino, pero cada envío es único. En el envío a un centro de consolidación/desconsolidación, los vehículos son enviados a un lugar determinado (Plataforma de operaciones) en donde las mercancías son descargadas y posteriormente puestas en otros vehículos, en los cuales las cantidades son enviadas combinando la carga para diferentes clientes en un mismo vehículo. Esta estrategia es adecuada cuando la utilización del vehículo es baja. En la estrategia de paradas múltiples, la mercancía de proveedores cercanos y sucesivos se consolida en un camión, el cual luego visita los clientes, ubicados igualmente de forma cercana y sucesiva para entregar la mercancía correspondiente (Robusté, 2005).

Rushton (2010) ha presentado diversas estrategias de distribución de mercancías, las cuales amplían lo presentado por Robusté (2005) y Estrada (2007). La Figura 5 resume las estrategias presentadas por Rushton (2010), en donde un punto de color negro simboliza un cambio en el responsable del canal de distribución.

Figura 5. Estrategias de distribución presentadas por Rushton (2010).

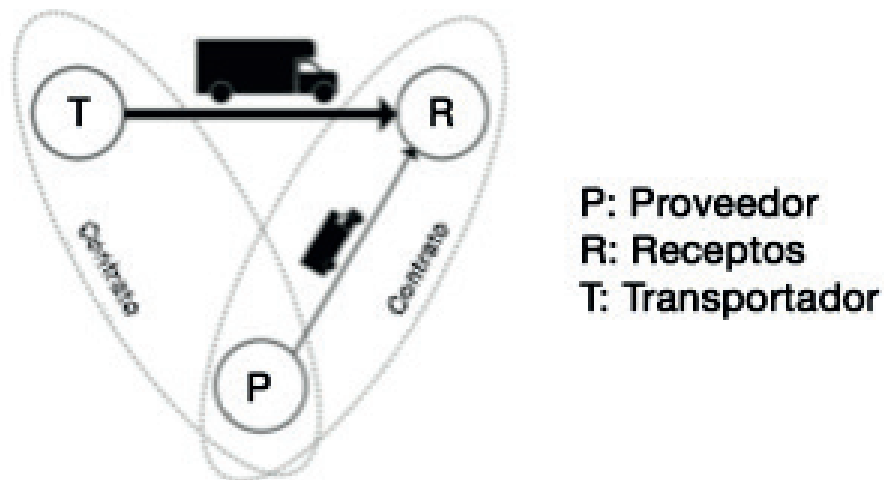


Fuente: Rushton (2010).

La mejor estrategia de distribución es la que asegure un nivel de servicio adecuado utilizando la menor cantidad de recursos, lo cual puede encontrarse utilizando combinaciones de las estrategias genéricas mencionadas. Es importante tener en cuenta que si no se utilizan adecuadamente los vehículos, las instalaciones y no se manipula adecuadamente las mercancías, todo proceso de distribución, sin importar que este bien diseñado, será ineficiente.

Al utilizar empresas externas de transporte, existe un proceso de contratación entre los transportadores, originadores y receptores de la carga. Verlinde *et al.* (2012) asegura que en la mayoría de las situaciones el proceso de contratación corresponde al esquema mostrado en la Figura 6, en la cual se realiza una negociación entre el cliente y el originador de la carga, y entre este último y el transportador, lo que conlleva a que no exista una relación contractual entre el transportador y cliente, que propicia una falta de comunicación entre las partes, generando descoordinación para la entrega de las mercancías y por tanto produciendo ineficiencias en los procesos de transporte.

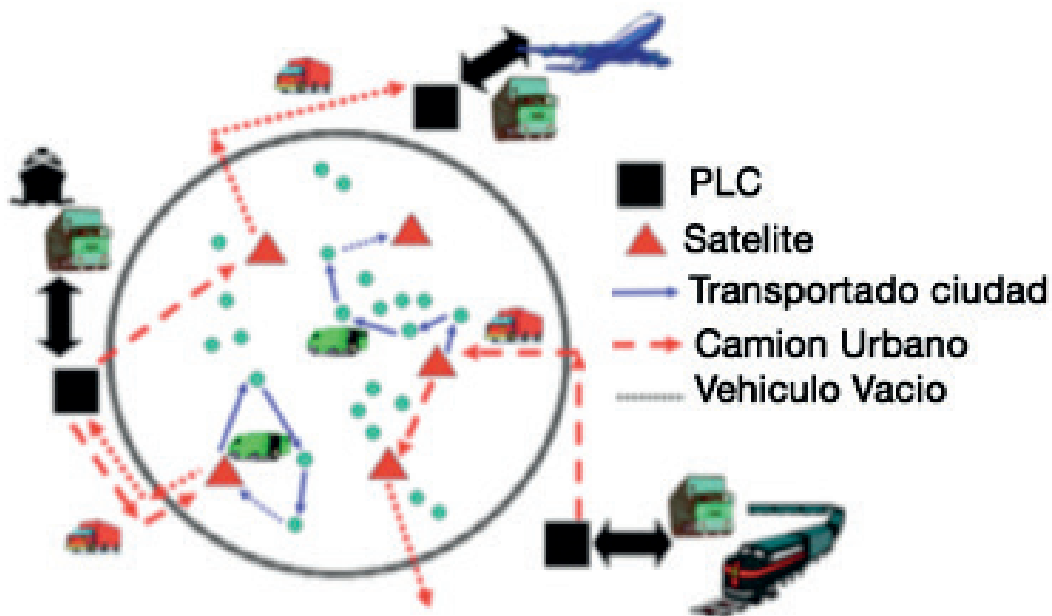
Figura 6. Esquema de contratación típico en la distribución urbana de mercancías.



Fuente: Verlinde *et al.* (2012)

Mancini *et al.* (2014) explica la configuración de una variante de la estrategia de consolidación con una plataforma logística de ciudad (PLC) utilizada para aquellas urbes de gran tamaño, la cual consiste en ubicar un conjunto de plataformas satélites al interior de la ciudad. En este caso existe un esquema de jerarquía de dos niveles en los procesos de distribución, como se muestra en la Figura 7.

Figura 7. Esquema de distribución de ciudad en dos niveles.



Fuente: Crainic *et al.*, 2012, citado en Mancini *et al.* (2014).

Alternativamente a las estrategias de envíos directos, consolidación y entregas múltiples, en los procesos de distribución urbana de mercancías existe otra alternativa para el transporte de mercancías, la cual se basa en la creación de áreas privadas, en las cuales los vehículos de las empresas pueden hacer procesos de transbordo de mercancía (consolidación y desconsolidación) a menor escala que las plataformas de logística de ciudad y los satélites. Estas zonas de transbordo pueden ser proporcionadas por la administración local de la ciudad o pueden ser parte de la infraestructura de la empresa transportadora, en las cuales la mercancía es descargada de un vehículo a otro, generalmente de menor tamaño o con especificaciones especiales para la distribución en ciudades (Verlinde *et al.*, 2012).

Visser *et al.* (2014) menciona la posibilidad de ubicar zonas al interior de las ciudades en donde los transportadores dejen su mercancía para que posteriormente los clientes pasen a recogerla. Estos lugares, conocidos con el nombre de “Pick up Points” (puntos de recogida), generalmente son lugares a donde la mercancía llega por acuerdo con el cliente cuando las entregas en la instalación del cliente final ha fallado o cuando los productos deben ser devueltos. Desde el punto de vista de distribución, estos puntos de recogida eliminan los

movimientos con entregas vacías y pueden ser un punto de consolidación importante para un amplio grupo de usuarios (Transportation Research Board, 2013).

Danielis *et al.* (2010) realizaron un estudio de los canales de distribución de diferentes cadenas de suministro al interior de las ciudades, encontrando que existen variaciones de una a otra, por el nivel de cuidado, las condiciones de las mercancías transportadas y por los efectos que las políticas de distribución generan en cada una de ellas.

1.2.1 Plataformas logísticas de ciudad

Una de las soluciones más comúnmente implementadas para la distribución urbana de mercancías es la construcción de una o varias plataformas logísticas de consolidación/desconsolidación cercanas o al interior de las ciudades (Ville *et al.*, 2011). Estas plataformas siguen la estrategia de enviar la mercancía a una plataforma de consolidación y permiten reducir el número de camiones de gran tamaño que ingresan a los centros urbanos, maximizando la capacidad del uso vehículos, disminuyendo las distancias de viaje y con esto reducir los costos del proceso de distribución (Estrada, 2007). Estas plataformas son proporcionadas por los administradores de la ciudad, para ser operadas por empresas privadas de transporte, generalmente a bajos costos, de forma que sean atractivas para su uso en los procesos de distribución.

La creación de estas plataformas logísticas urbanas surge como una medida para disminuir el número de camiones grandes en las ciudades y desde el punto de vista logístico es adecuada al permitir incrementar el factor de carga de los vehículos y utilizar vehículos que permitan un movimiento más ágil, lo cual permite disminuir el costo unitario de transporte y el tiempo de servicio en las ciudades (Estrada, 2007). Estas plataformas pueden ser de diferentes tipos: privadas, de múltiples usuarios y específicos (Ville *et al.*, 2011). Las plataformas privadas o semiprivadas son de uso exclusivo de una empresa o grupo de empresas de transporte, sin intervención de las autoridades públicas, con el único fin de mejorar el desempeño económico en la distribución de dichas empresas. Las plataformas multiusuario por su parte, son proyectos de las autoridades o de un grupo de empresas pero con la intención de prestar el servicio a las demás empresas que realizan operaciones en la ciudad (uso público). Las plataformas específicas son instalaciones temporales o permanentes que presentan un uso para el manejo de mercancías con características especiales en su manipulación, y no siempre tienen la finalidad de ser plataformas disponibles a todo tipo de empresas (Ville *et al.*, 2011).

Según Dablanc (2007), Ville et al (2011) y González-Feliu (2012), el uso de plataformas logísticas de ciudad ha sido un concepto aplicado en muchas ciudades de países desarrollados. Sin embargo, tras estudiar los costos operacionales de estas terminales han encontrado que en muchos casos no son rentables. Por esta causa, las plataformas para la distribución urbana de mercancías generalmente requieren la intervención de las autoridades para su funcionamiento. Esta intervención se da de dos maneras: la primera, financiando la plataforma para su sostenimiento; la segunda de tipo legislativo, con lo cual se obliga o favorezca a las empresas a utilizar las plataformas (Ville *et al.*, 2011).

Sin embargo, no todas las iniciativas de plataformas de logística de ciudad han fracasado, toda vez que han podido encontrar medios que le han permitido a las empresas su utilización de manera atractiva (Dablanc (2007; Ville et al (2011); González-Feliu (2012). Si bien los incentivos económicos por parte de las administraciones son la medida más rápida para mantener en funcionamiento estas instalaciones, existen otras alternativas de incentivos de tipo No-económicos que han conducido al éxito de plataformas logísticas de ciudad, tales como (Transportation Research Board, 2013):

- Dar prioridad de acceso a los centros urbanos a las empresas que utilicen las plataformas logísticas de ciudad.
- El transporte desde las plataformas logísticas a los clientes en la ciudad lo realiza una empresa independiente, de forma que sea más aceptable optar por este transporte para todas las partes que utilizan la plataforma.
- Elaboración de planes basados en la rentabilidad de las empresas, que permitan paulatinamente reducir los incentivos por parte de las administraciones locales.
- Los planes de inversión en las plataformas de logística de ciudad deben hacerse en colaboración de las autoridades y la empresa privada, de forma que haya un incentivo para las empresas, así como un compromiso de las mismas.

Debido a los problemas presentados en la operación de las plataformas logísticas de ciudad, se requieren estudiar métodos más eficientes para generar procesos de distribución de mercancías en entornos urbanos, en el cual se contemple el punto de vista de varios actores y que velen porque sean atractivas económicamente para todas las partes involucradas (Dablanc, 2007; Verlinde *et al.*, 2012).

1.3 Costos de distribución urbana de mercancía

Los procesos de distribución de mercancía tienen asociados a su realización dos tipos de costos: el primero son aquellos costos en los que incurre el vehículo y la empresa transportadora y que aportan a la estructura de costos del producto (Costos privados) y el segundo tipo son los costos externos, los cuales son aquellos que se generan a la sociedad, por el uso de la infraestructura pública, la generación de accidentes, la congestión, la contaminación, la salud, etc., los cuales no son considerados por las empresas privadas en su estructura de costos (Maibach, 2007).

Los costos externos de la distribución urbana de mercancías son de vital importancia desde el punto de vista de los administradores locales y la sociedad, pero de menor consideración para las empresas, las cuales normalmente se concentran en reducir sus costos de operación. Los costos externos asociados a los procesos de distribución urbana de mercancías han sido estudiados por varios autores como es el caso de Mayares *et al.* (1996), Maibach *et al.* (2007), Fernandez-Barcelo y Campos-Cacheda (2012) y Macharis *et al.* (2014).

Con respecto a los costos privados, los cuales son cuantificados para evaluar y controlar el desempeño de las empresas, al ser propios de cada organización no son ampliamente difundidos, por lo cual la información al respecto es escasa. Sin embargo, algunos autores han estudiado la generalidad del proceso de distribución urbana de mercancías, presentando resultados globales, como en el caso de Deflorio (2012), quien menciona que los costos de transporte representan entre el 15% y 20% de los costos finales de un producto y son equivalentes a casi la mitad de los costos logísticos.

Los costos variables para un transportador están relacionados con los tiempos de transporte y las distancias recorridas y son influenciados por la configuración de la red de carreteras, la naturaleza de la demanda y la calidad ofrecida por el servicio. El costo asociado a la distribución urbana de mercancías afecta directamente el costo final del producto, alterando la competitividad de las empresas y de la economía de la ciudad. Estos costos varían de acuerdo a la hora en que se realiza la distribución (Antun, 2013).

Los costos en la distribución urbana de mercancías también se ven afectados por la relación entre el transportador y el cliente, ya que si no hay una coordinación para los envíos, se incurre

en ineficiencias del proceso, representadas en distancias innecesarias cuando los productos no pueden ser entregados o por tiempos de espera para la entrega, tanto del vehículo como del receptor, cuando el vehículo llega tarde o cuando tiene que esperar para ser atendido.

Para reducir los costos de distribución, las empresas realizan esfuerzos por mejorar los procesos de distribución, que van desde la planificación de los envíos hasta el uso de recursos más eficientes, como es el caso de la utilización de vehículos con combustibles más eficientes y de instalaciones que permitan aminorar dichos costos. En el uso de nuevos vehículos, autores como Thompson y Hassall (2014) y Gruber *et al.* (2014) han estudiado la posibilidad técnica y económica de implementar nuevos vehículos para la distribución urbana de mercancía, como son el caso de vehículos de alta productividad o triciclos eléctricos para el transporte de los productos al interior de los centros urbanos.

1.4 Medidas del nivel de servicio aplicables a los procesos de distribución urbana

Así como los costos de transporte son importantes para las empresas involucradas en los procesos de distribución urbana de mercancías, el nivel de servicio también es un elemento perseguido, toda vez que el cliente debe estar satisfecho y factores como el cumplimiento de las entregas, la recepción de cantidades adecuadas y las entregas a tiempo, son elementos tenidos en cuenta para medir su grado de satisfacción.

Según Rushton (2010), el nivel de servicio en los procesos de transporte puede ser medido de diferentes formas, las cuales están clasificadas en dos grupos: Medidas de las transacciones y medidas de los atributos funcionales. La Tabla 2 resume la propuesta de clasificación de las medidas de nivel de servicio propuesta por Rushton (2010).

En los procesos de distribución urbana de mercancías, la calidad en el servicio está relacionada con los tiempos de viaje, los cuales dependen de condiciones propias de las ciudades, como las distancias necesarias a recorrer, la velocidad promedio de circulación, el tiempo requerido entre recogida y/o entrega de mercancía, el tiempo disponible para hacer paradas, el tráfico, etc. (Deflorio *et al.*, 2012).

Tabla 2. Medidas de nivel de servicio en el transporte de mercancías.

Categoría	Componente	Ejemplos
Medidas Transaccionales	Elementos previos	Política de servicio definida, accesibilidad al personal generador de órdenes, estructura organizacional, elementos de la transacción, etc.
	Elementos transaccionales	Tiempo de ciclo de orden, preparación de la orden, alternativas de entrega, tiempo de entrega, condición de los materiales, información relacionada con la orden, etc.
	Elementos posteriores	Procedimientos y precisión de facturación, política de devoluciones y quejas, garantías del servicio, etc.
Medidas funcionales	Tiempo	Tiempo de ciclo para cumplir una orden
	Confiabilidad	Cumplimiento de los tiempos de entrega y del estado de los productos prometidos.
	Comunicaciones	Facilidad para realizar una orden y respuesta a quejas.
	Flexibilidad	Capacidad de responder a los cambios de las necesidades del cliente

Fuente: Rushton *et al.* (2010).

Cada uno de los actores involucrados en los procesos de distribución urbana tienen diferentes formas de medir el nivel de servicio. Entre los intereses más comunes relacionados con los niveles de servicio, se encuentra que los clientes buscan que las entregas se realicen a tiempo, en las condiciones y con las especificaciones adecuadas de las mercancías, que no hayan cambios en las entregas, y que el tiempo de entregas de las mercancías sea corto (Visser *et al.*, 2014); El nivel de servicio de los transportadores generalmente se mide con relación al grado de satisfacción de las necesidades de los clientes, e incluye los tiempos para recoger y entregar las mercancías, entrega de productos sin daños, confiabilidad en los tiempos de entrega, confiabilidad en la información y el cumplimiento de las ventanas de tiempo (Taniguchi, 2001); los ciudadanos buscan que los procesos de transporte en las ciudades no generen efectos negativos en su calidad de vida, por lo cual persiguen que no haya congestión, ruido, contaminación y accidentes causados por los procesos de transporte urbano (Taniguchi 2001); Los administradores pretenden satisfacer las necesidades de los ciudadanos, por lo que buscan mitigar las congestiones de tráfico, la contaminación y mejorar las condiciones de

seguridad en la ciudad, pero también buscan asegurar el desarrollo económico, incrementar las oportunidades de trabajo y resolver los inconvenientes presentados entre los otros autores (Taniguchi 2001).

1.5 Manejo de la información en la distribución urbana de mercancías

De acuerdo a Crainic (2008) y Arango et al (2011), debido a la complejidad de los procesos de distribución urbana de mercancías, estos deben estar ligados a un sistema de información que permita su administración de forma eficiente, teniendo como objetivos la captura, procesamiento, transporte, y gestión de dicha información. Esto ha llevado a la producción de herramientas informáticas especializadas en la gestión del transporte, como es el caso de los Sistemas Inteligentes de Transporte – ITS y a la integración de herramientas para la gestión administrativa de las operaciones y la toma de decisiones (Arango et al, 2011 y Pillac *et al.*, 2011).

Los ITS son sistemas y herramientas informáticas que aplican tecnología a los procesos de transporte que permiten capturar, comunicar, computar y ayudar a la toma de decisiones, con lo cual es posible administrar de forma adecuada el movimiento de los vehículos, los demás medios de transporte, así como la mercancía transportada en estos (Benjelloun *et al.*, 2010). Para la adecuada gestión de un sistema de transporte se requiere la integración de tecnologías como el internet, el intercambio electrónico de datos, las comunicaciones inalámbricas, las tecnologías de cómputo, la programación y las tecnologías destinadas al censo y captura de información (Zapata et al, 2010). Jarašūnienė (2007) establece que la integración de los ITS permiten el intercambio y la coordinación de la información, la adquisición e integración entre los vehículos e infraestructura y el intercambio de la información entre empresas privadas (proveedores de servicios logísticos), instituciones públicas (Autoridades administradoras de los procesos de transporte a nivel de ciudad y nacionales) y organizaciones no relacionadas con el transporte, como el caso de entidades de pago electrónico.

De acuerdo a los trabajos de Jarašūnienė, (2007), Zapata *et al.* (2013), BESTUFS (2007) y Civitas (2013), las ITS pueden utilizarse con fines de gestión de las operaciones por parte de las empresas o para la gestión y control vehicular por parte de las autoridades. Entre

los sistemas de información y herramientas mencionadas para la gestión de las empresas se mencionan:

- Transport Management Systems.
- Sistemas de trazabilidad de vehículos.
- Sistema de posicionamiento global - GPS.
- Sistemas satelitales de navegación global.
- Tecnologías de identificación Automática de productos como radio frecuencia y códigos de barra.
- Tecnologías de identificación Automática de vehículos como radio frecuencia y Reconocimiento óptico de caracteres.
- Termografía.
- Sistemas de asistencia avanzada al conductor.
- Computadores a bordo en los vehículos.
- Sistemas de Pago electrónico.

Entre los utilizados para el control de flujo de vehículos en las ciudades se encuentran:

- Control electrónico de acceso.
- Señalización para el ruteo de vehículos.
- Sistemas de administración de fletes.
- Detectores de velocidad.
- Sistemas de pesaje en movimiento.
- Detección automática de incidentes.
- Sistemas de administración avanzados de tráfico (ATMS – Advanced Traffic Management Systems).
- Señalización digital en vías.
- Circuito cerrado de video para el monitoreo y control del tráfico.
- Sistemas de escaneo de vehículos.

Una de las características más importantes de los sistemas de información es que permiten obtener y hacer disponible la información para la administración de las empresas. Con base en la disponibilidad de la información, la gestión por medio de indicadores es el método más aplicado para la evaluación del desempeño de las diferentes áreas de las organizaciones, lo cual es especialmente útil en el transporte de mercancías, ya que este proceso requiere evaluar elementos tanto internos como externos a la operación en sí (Arango et al., 2010).

1.5.1 Indicadores de calidad y eficiencia a tener en cuenta en un sistema logístico de ciudad

Debido a la multiplicidad de elementos a considerar en los procesos de distribución urbana de mercancías como producto de los múltiples actores y factores económicos y sociales a considerar, existe un alto número de variables que deben ser evaluadas para determinar el desempeño de los procesos de distribución. Varios actores han presentado indicadores para medir lo que han considerado importante en sus trabajos, tal y como se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Diferentes indicadores para logística de ciudad

Indicador	Autor
Costos total.es/envío	Muñuzuri (2003), Vieira <i>et al.</i> (2015)
Costos de manejo de material.es/envío	Muñuzuri (2003)
Costos de alquiler de vehículos/envío	Muñuzuri (2003)
Costo de inventario de material.es /año	Muñuzuri (2003)
Costo de parar/paradas	Muñuzuri (2003)
Número de paradas/por envío	Muñuzuri (2003)
Costo de transporte/km recorridos	Muñuzuri (2003)
Tiempo de entrega/pedido	Muñuzuri (2003), Anderson <i>et al.</i> (2005), Vieira <i>et al.</i> (2015)
Capacidad promedio de vehículos	Muñuzuri (2003)
Utilización promedio de vehículos	Muñuzuri (2003), Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
% de entregas perfectas	Muñuzuri (2003), Vieira <i>et al.</i> (2015)
% de entregas retrasadas	Muñuzuri (2003), Vieira <i>et al.</i> (2015)
Cantidad de CO ₂ emitido por las actividades de transporte	Muñuzuri (2003), Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012), Anderson <i>et al.</i> (2005), Anand <i>et al.</i> (2012)

Indicador	Autor
Volumen de transporte de acuerdo a grupos de productos (toneladas)	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Volumen de transporte por área urbana (toneladas)	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Carga promedio por vehículo (Toneladas)	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Intensidad del transporte de carga	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Uso compartido de empleados en logística (%)	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Sistemas de transporte conjunto de pasajeros y carga (distribución regional.)	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Distancia media de transporte	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012) Anderson <i>et al.</i> (2005)
Emisiones de material. particulado/kilómetros total.es (toneladas/Km total.es)	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012) Anderson <i>et al.</i> (2005)
Emisiones de NOx/kilómetros total.es (toneladas/Km total.es)	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012) Anderson <i>et al.</i> (2005)
Energía consumida por tonelada transportada	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Disminución de los niveles de ruido producidos por la distribución de mercancías	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Disminución de la superficie (área) requerida para la distribución de mercancías	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Disminución de accidentes y efectos negativos ocasionados por la distribución de mercancías	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012) Anand <i>et al.</i> (2012)
Participación / Integración de actores en la planeación del transporte	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Libertad de selección de modo de transporte	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Accesibilidad de la mercancía	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Densidad de tiendas	Ruesh <i>et al.</i> (2007), Ruesh <i>et al.</i> (2012)
Número de rutas de envíos utilizadas / Número de rutas de envíos requeridas	Anderson <i>et al.</i> (2005)
Tiempo de movimiento y tiempo de estacionamiento	Anderson <i>et al.</i> (2005)
Velocidad de los vehículos	Anderson <i>et al.</i> (2005)
Rentabilidad	Anand <i>et al.</i> (2012)
Bonanza local.	Anand <i>et al.</i> (2012)

Indicador	Autor
consumo de combustible	Anand <i>et al.</i> (2012)
Ocurrencia de daños en los envíos	Vieira <i>et al.</i> (2015)
Entregas de productos devueltos	Vieira <i>et al.</i> (2015)
Perdidas de producto	Vieira <i>et al.</i> (2015)
Disponibilidad de los vehículos	Vieira <i>et al.</i> (2015)
Confirmación de entregas en tiempo real.	Vieira <i>et al.</i> (2015)

Fuente: Elaboración propia.

González-Feliu y Morana (2014) presentaron un conjunto de indicadores para evaluar el desempeño de los procesos de colaboración de transportadores en la distribución urbana de mercancías. Por su parte Haghshenas y Vaziri (2012) presentaron un conjunto de indicadores para medir la sostenibilidad de los procesos de transporte, de forma que estos permitan la comparación con casos de estudio a nivel global. En la búsqueda de información sobre cómo medir las mejoras en las condiciones ambientales producidas por los sistemas de logística de ciudad, Muñuzuri *et al.* (2010) establecen que en el caso de la sostenibilidad y con el propósito de comparar diferentes tipos de transporte, el indicador más relevante es la medición de la huella de carbono producida por el sistema de distribución.

1.6 Tendencias en los procesos de distribución urbana de mercancías

De acuerdo con Antún (2013) las tendencias recientes para mejorar los procesos de distribución urbana de mercancía se enmarcan en 8 grupos:

- Reducción de inventario mediante un sistema conformado por un solo centro de distribución y un conjunto de centros de carga de pedidos mediante crossdocking satélites para satisfacer niveles de servicio al cliente
- Desarrollo de alternativas innovadoras para el procesamiento de pedidos y atención a clientes.
- Procesamiento de pedidos por lotes y limitación a la individualización de las entregas en e-commerce.

- Desarrollo de procesos y operaciones de logística inversa para satisfacer requerimientos de normas y políticas públicas de reciclado.
- Introducción de innovaciones de tecnología de la información en logística.
- Innovación en la tecnología de vehículos.
- Externalización de operaciones mediante operadores logísticos con flotas dedicadas.
- Preferencia por ubicación de infraestructura propia o de operadores logísticos para la distribución física en centros o parques logísticos.

Estas tendencias por si solas abren campos de estudio relevantes para la búsqueda de mejoras de los procesos de distribución de mercancías en entornos urbanos, los cuales pueden ser analizados de forma individual o conjunta.

Los elementos presentados en este capítulo demuestran la importancia y complejidad de los procesos de distribución urbana de mercancías, así como los elementos que deben tenerse en cuenta para la generación de propuestas que busquen mejorar el desempeño logístico de las empresas y las condiciones de vida de los habitantes en las ciudades (enfoque de logística de ciudad). La colaboración entre actores es una de las estrategias más promisorias para afrontar los problemas de distribución urbana de mercancías (Macharis y Melo, 2011; Paché, 2008; González-Feliu y Salanova, 2012), concepto que es estudiado en el siguiente capítulo y en el cual se basa el modelo propuesto en esta tesis doctoral.

2 Colaboración en el proceso de distribución urbana de mercancías

En este capítulo se presenta una revisión sobre los procesos de colaboración entre empresas, tanto para entornos urbanos como interurbanos, lo cual es la base del modelo propuesto en esta tesis doctoral. En este capítulo se analizan los mecanismos y tipos de colaboración entre empresas, los tipos de colaboración en la cadena de suministro y se revisan los trabajos de colaboración en logística y cadena de suministro, para la gestión de inventarios y para los procesos de distribución urbana de mercancías.

La colaboración en la cadena de suministros ha demostrado ser una manera por medio de la cual las empresas logran obtener ventaja competitiva, permitiendo soportar las presiones de los mercados y hacer frente a los entornos de alta competencia (Lee y Whang 2001, Fawcett y Magnan, 2004; cao y Zhang 2011; Leitner *et al.*, 2011; Jeevanunta *et al.*, 2013). La colaboración entre empresas ha sido estudiada de forma intensa desde los años 1990's (Goffin *et al.*, 2006; Allred *et al.*, 2011; Nyaga *et al.*, 2010; Fawcett *et al.*, 2011), sin embargo algunos autores mencionan que aún queda mucho trabajo por realizar (Goffin *et al.*, 2006) de forma que se pueda conocer su real potencial en la generación de valor para las empresas.

La colaboración se refiere a la realización de esfuerzos conjuntos entre empresas independientes, desde el intercambio de información, planificación, ejecución, hasta alianzas estratégicas (Simatupang y Sridharan 2002; D'Amours *et al.*, 2006; Crujssen 2007; cao y Zhang 2011), buscando obtener mayores beneficios que los obtenidos al realizar las actividades de manera independiente (Cao y Zhang 2013). La colaboración pretende encontrar una relación de “gana-gana” entre las partes (Naesens *et al.*, 2007).

El concepto de colaboración ha sido definido por múltiples autores, como es el caso de Simatupang y Sridharan (2005) quienes definen la Colaboración como el trabajo conjunto de dos o más empresas, para crear ventaja competitiva y altas ganancias que no pueden lograrse si actúan independientemente. Para Derroiche *et al.* (2008) la colaboración significa la cooperación cercana entre compañías autónomas, comprometidas con unir esfuerzos para efectivamente cumplir con las necesidades de los clientes finales al menor costo. Zhang *et al.* (2012) definen la colaboración en la Cadena de Suministros como la coordinación y los esfuerzos mutuos de cada agente, con el objetivo de mejorar la competitividad global de las partes. Chan y Prakash (2010) la definen como el proceso de asociación a largo plazo, en donde las partes trabajan juntas para alcanzar ventajas mutuas, que son mayores que aquellas obtenidas individualmente.

Cao y Zhang (2013) han encontrado que básicamente estas definiciones pueden enmarcarse en dos categorías: las definiciones que se centran en el proceso y las que se centran en el relacionamiento: en la primera se define la colaboración como el intercambio de información, la integración de procesos, la toma de decisiones y la resolución conjunta de problemas, el intercambio de recursos y el alineamiento de incentivos entre empresas independientes de una misma cadena de suministro. Las definiciones basadas en el relacionamiento, establecen que la colaboración se refiere a la formación de asociaciones cercanas y pensadas a largo plazo entre empresas, que buscan alcanzar objetivos comunes mediante el trabajo compartido y el intercambio de información, recursos y el riesgo de las operaciones.

A partir de estas definiciones y de estudios presentados por autores como Manthou *et al.*, (2004); Angeles y Nath (2001); González-Feliu (2012) y Bautista-Santos *et al.* (2015), se puede argumentar que los procesos de colaboración se refieren al trabajo conjunto, el intercambio de información y de recursos, la integración de procesos, la planificación conjunta, compartir la toma de decisiones para resolver problemas, compartir beneficios, el enfoque de largo plazo y el relacionamiento cercano, mediante el cual las empresas, a través de la integración entre dos o más organizaciones, pueden alcanzar objetivos comunes y obtener mejores beneficios que aquellos logrados cuando sus actividades son realizadas de manera independiente. La colaboración involucra la relación inter-empresarial, donde las partes trabajan cerca y acuerdan compartir información, recursos, recompensas, riesgos y responsabilidades, así como realizar procesos de planificación, toma de decisiones y resolución de problemas de manera conjunta (Chan y Prakash, 2010; Manthou *et al.*, 2004; Swink, 2006).

La colaboración se encuentra en un nivel superior a los conceptos de cooperación y coordinación, en el sentido de que estos últimos no necesariamente requieren del consenso entre las partes involucradas para la planificación, toma de decisiones o ejecución de las actividades (Cao y Zhang, 2013). En la colaboración se desarrolla un proceso conjunto entre las partes, en el cual existe un acuerdo sobre los objetivos, medidas, procesos y reglas establecidas para llevar a cabo las actividades que permitan obtener los resultados perseguidos en el proceso de colaboración (Dudeck, 2009). La colaboración incluye más elementos que la cooperación, relacionados con el intercambio de la información, riesgos, conocimientos y ganancias, así como un alto grado de cercanía entre las empresas participantes (Golicic *et al.*, 2003; leitner *et al.*, 2011). La colaboración no se refiere exclusivamente a la realización de transacciones, sino que es un verdadero uso conjunto de la información y la creación de conocimiento sobre el mercado y las operaciones empresariales, de forma que sea posible obtener ventajas competitivas entre las organizaciones (Malhotra *et al.*, 2005).

Aunque puede ser clara la separación entre los conceptos de colaboración, coordinación, y cooperación (Cao y Zhang 2013), en la literatura científica es común que estos conceptos se traten como sinónimos, para indicar el trabajo conjunto entre diferentes organizaciones (Dudeck, 2009; Camarinha-Matos *et al.*, 2009; Leitner, 2011; Iankoulova, 2012; Androilo *et al.*, 2015; Bautista-Santos *et al.*, 2015).

Yang y Odani (2006) y Iankoulova (2012), mencionan que el mayor generador de procesos de colaboración entre empresas es la posibilidad de lograr beneficios económicos adicionales para las partes, pero existen otros motivadores como el acceso a nueva tecnología, el cumplimiento de normas y estándares y la visión estratégica de la empresa (Iankoulova (2012).

Entre las actividades que deben realizarse de forma conjunta en los procesos de colaboración se pueden encontrar aquellas relacionadas con la planificación estratégica, la gestión de las relaciones con los clientes, la administración de operaciones (Producción, Inventario, Distribución), intercambio y comunicación de la información (Cao y Zhang, 2011) y planificar y ejecutar actividades de responsabilidad social empresarial (Pearce y Doh, 2005).

El objetivo central de los procesos de colaboración es la optimización del desempeño de la cadena de suministro, mediante diferentes actividades (Mejoramiento de procesos de planificación y

pronósticos, calidad en las entregas, reducción de inventarios y mejoras del servicio) (li *et al.*, 2014), que produzcan valor de forma conjunta entre las empresas, de manera que puedan alcanzarse los objetivos perseguidos por cada una de las partes.

Crijssen *et al.* (2007) ha clasificado las oportunidades de la colaboración en logística en cuatro grupos, como se presenta en la figura 8.

Figura 8. Oportunidades en colaboración.



Fuente: Crijssen *et al.* (2007).

Para llevar a cabo procesos de colaboración entre empresas, es necesario desarrollar habilidades y modificar elementos del comportamiento en las organizaciones, por lo cual deben fortalecerse las capacidades requeridas para que la comunicación entre las empresas fluya correctamente. El intercambio de la información es el componente fundamental de los procesos de colaboración (Kim *et al.*, 2005; Hall y Saygin, 2012; Cao Yy Zhang, 2013), ya que si esta no es compartida de manera adecuada, los demás procesos reciben datos erróneos, generando el fracaso de los esfuerzos de colaboración (Min *et al.*, 2005; Sheu *et al.*, 2006; Esposito y Passaro, 2009). Para mejorar el comportamiento en las organizaciones, se debe trabajar en la cultura organizacional con el objetivo de desarrollar las capacidades necesarias para ejecutar estos proyectos de colaboración. De esta forma se requieren desarrollar capacidades que permitan establecer un contacto efectivo con las demás organizaciones colaboradoras. Los componentes culturales requeridos para establecer procesos colaborativos son (Cao y Zhang, 2013): Cultura hacia la

colaboración, colectivismo, resolución de conflictos, orientación a largo plazo, simetrías de poder, evasión del riesgo y confianza.

2.1 Mecanismos y tipos de colaboración entre empresas

Las redes de colaboración pueden estar compuestas por empresas independientes o partes de estas. La mayoría de las redes de colaboración implican una organización de actividades y la definición de reglas y roles para sus participantes (Camarinha-Matos *et al.*, 2009).

Min *et al.* (2005) menciona que la colaboración entre empresas pueden verse como dos esquemas diferentes: En el primero la colaboración se convierte en un proceso inter-organizacional de las empresas y en el segundo la colaboración es exclusivamente una relación entre estas. En los casos en que la colaboración se ve como un proceso de la empresa, las partes trabajan conjuntamente para alcanzar metas comunes que benefician a las empresas participantes. Estos procesos incluyen la toma de decisiones y la solución de problemas de forma conjunta. En el caso en que la colaboración es vista como el establecimiento de vínculos entre empresas, las partes involucradas trabajan de manera conjunta e intercambian información, recursos y cierto grado de riesgo en las operaciones. La implementación de procesos de integración conlleva a que las empresas deban migrar desde organizaciones focalizadas en las funciones empresariales a esquemas focalizadas en los procesos, siendo necesaria una visión global de la organización y del negocio (Amer y Luong, 2012).

Existen múltiples mecanismos mediante los cuales es posible realizar actividades colaborativas entre empresas. Martínez Fierro (2001) menciona las siguientes alternativas desde el punto de vista de la colaboración.

- Transacciones entre empresas.
- Fusiones entre empresas.
- Desarrollo interno de actividades.
- Coaliciones o alianzas.
- Absorciones de empresas.
- Establecimiento de asociaciones de empresas.
- Ampliación del ámbito de actuación de las empresas a todo el mundo.

Por su parte Fernandes da silva (2005) argumenta que los mecanismos más utilizados en ambientes de colaboración entre empresas son alianzas estratégicas (join ventures), clusters, cooperación interempresarial, aglomeraciones empresariales, redes empresariales, consorcios y asociaciones entre empresas.

Las alianzas estratégicas son uniones temporales entre empresas o grupos de personas que pueden tener horizontes de tiempo corto, mediano y largo, las cuales se forman para aprovechar oportunidades específicas encontradas en el mercado, como complementar la oferta de productos o la realización de esfuerzos de comercialización y desarrollo de productos. En estas alianzas las empresas son responsables de realizar funciones específicas, pero actuando como un conjunto con todas las empresas participantes (Capó *et al.*, 2003). Las alianzas pueden ser clasificadas en verticales y horizontales, si están formadas por empresas de diferentes niveles de la cadena de suministro o por empresas que se encuentran en el mismo nivel (competidores), respectivamente (capó *et al.*, 2003). Los Clusters son agrupaciones de empresas o instituciones que se encuentran relacionadas entre sí, las cuales pertenecen a un mismo sector económico o segmento del mercado, con la particularidad de estar ubicadas en áreas geográficas cercanas y que colaboran entre sí para lograr ser más competitivas en el mercado y aprovechar nuevas oportunidades que este ofrezca.

En un enfoque más abarcador, Camarinha-Matos *et al.* (2009) presenta las diferentes formas que pueden encontrarse en la colaboración con fines empresariales, desde procesos colaborativos en una cadena de suministro hasta la agrupación de personas, las cuales son:

- Redes de colaboración.
- Cadenas de suministro.
- Gobiernos virtuales colaborativos (e-government).
- Empresas virtuales.
- Organizaciones virtuales.
- Empresas extendidas.
- Equipos virtuales
- Zonas de producción (Breeding environments): clusters industriales, distritos industriales, ecosistemas de negocios.

- Redes de laboratorios virtuales.
- Redes de rescate de desastres.
- Comunidad virtual de profesionales.

Las redes de colaboración son empresas o personas autónomas y diferentes que realizan acciones conjuntas para alcanzar o mejorar objetivos comunes. Las cadenas de suministro son redes de empresas de una misma cadena de valor que cubren desde la adquisición de materias primas hasta la entrega final a los clientes, las cuales colaboran para obtener mejores niveles de competitividad para el conjunto de empresas. Los gobiernos virtuales colaborativos se refieren a alianzas entre organizaciones gubernamentales para entregar a sus usuarios (ciudadanos, empresas y otras organizaciones gubernamentales) mejores niveles de servicio y mejorar internamente sus procesos. Las empresas virtuales son alianzas temporales de empresas para compartir habilidades, competencias y recursos buscando responder adecuadamente a las oportunidades del mercado (incrementar beneficios económicos).

Mínguez (sf) argumenta que las empresas colaboran dependiendo el tipo de resultado que desean alcanzar, encontrándose mecanismos de colaboración comercial, tecnológicos, de producción y de otras formas. Los procesos de colaboración comerciales buscan compartir recursos para atender mercados existentes o nuevos, de ámbito local o internacional, abrir nuevos canales de venta o intercambiar productos entre compañías de diferentes mercados; La colaboración tecnológica busca que las empresas puedan acceder a tecnologías de procesos y de producto que les generen mayor valor; La colaboración productiva pretende que las empresas incrementen sus capacidades de producción, disminuir su rigidez, especializar la producción, producir o mejorar estrategias de subcontratación y aumentar su flexibilidad de los procesos de producción/prestación de servicios mediante procesos de colaboración con otras empresas. Otros mecanismos de colaboración tienen que ver con actividades relacionadas para obtener mejores procesos de mercadeo, de recursos humanos en la selección y formación de personal, de servicio posventa, obtención de recursos financieros, entre otros. La tabla 4 presenta los mecanismos de colaboración presentados por Mínguez (sf).

Tabla 4. Mecanismos de colaboración de acuerdo a los objetivos de colaboración.

Objetivo de la colaboración	Mecanismo
Comercial	Consortio de exportación
	Club de empresas
	Antena colectiva
	Piggy Back
	Distribución comercial reciproca/cruzada
	Joint Venture
Tecnología	Transferencia tecnológica
	Investigación, desarrollo e innovación compartido
	Licencia de patentes y marca
Productivo	Central de compras
	Cooperación en la fabricación y ensamblaje
	Implantación productiva
Otros	Adquisición financiera apalancada
	Sociedades de intermediación
	Contratación de servicios de selección de personal.
	Alianzas para servicio posventa

Fuente: Mínguez (sf).

Los procesos de colaboración también pueden ser clasificados de acuerdo a las características como estos se desarrollan. De esta forma, *Audy et al.* (2010) presenta cinco mecanismos de coordinación genérica aplicables a procesos logísticos, que difieren en la forma como se realiza la coordinación, el intercambio de los recursos y los flujos de información, efectivo y de decisión.

Uno de los elementos clave de los procesos de colaboración es la manera como distribuir adecuadamente los beneficios generados mediante el proceso de colaboración. Para realizar esta distribución de beneficios entre las diferentes partes existen varios métodos, que van desde la distribución proporcional, dependiendo de diferentes factores como la cantidad de carga enviada, el número de clientes, los costos logísticos previos a la colaboración, distancias, número de órdenes, hasta modelos más elaborados como el valor Shapley, el cálculo del núcleo, el análisis de los costos separables y no separables, precios sombra, entre otros (*Frisk et al.*, 2010; *Lehoux et al.*, 2009; *Iankoulova*, 2012). La distribución de estos beneficios pueden ser calculados en una etapa posterior al proceso de colaboración, o pueden ser computados desde el momento de la planeación (*Audy et al.*, 2010).

2.2 Tipos de colaboración en la cadena de suministro

La colaboración entre empresas se da en los niveles estratégico, táctico y operativo. En el nivel estratégico se involucran las decisiones que pueden afectar el direccionamiento de las empresas y requieren compartir infraestructura especializada y clave para el funcionamiento de las empresas, así como el uso de información reservada de las empresas. En los niveles operativo y táctico se requiere un nivel de compromiso e intercambio de recursos y de información, pero a un menor nivel que en el estratégico (Audy *et al.*, 2010). Andres y poler (2011) estudiaron los tipos de colaboración entre empresas, teniendo en cuenta los niveles de decisión en las empresas, los cuales se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Tipos de colaboración con respecto a los niveles de decisión.

Nivel decisión	Tipo Colaboración
Estratégico	• Creación de redes de empresas virtuales
	• Toma de decisiones colaborativas
	• Selección de socios de colaboración
	• Integración empresarial
	• Alineación estratégica
	• Negociación colaborativa de contratos
Táctico	• Planificación colaborativa
	• Previsión y reaprovisionamiento colaborativo
	• Gestión del conocimiento
	• Medición del rendimiento
	• Gestión de la incertidumbre
Operativo	• Mecanismos de coordinación
	• Programación colaborativa de la producción
	• Negociación de precios y fechas de vencimiento
	• Proceso de comprometer pedidos
	• Gestión de inventarios
	• Eliminación del efecto látigo (Bullwhip Effect)
	• Gestión del intercambio de la información
	• Conexión entre procesos
	• Interoperabilidad

Fuente: Andres y poler (2011).

Los tipos de colaboración pueden ser clasificados en tres grandes grupos: colaboración vertical, horizontal y colaboración lateral (Fernandes da silva 2005; Barrat y Oliveira, 2001; Naesens *et al.* (2007); audy 2010, lankkounova 2012). La primera se refiere a la colaboración con proveedores, interna (entre funciones logísticas) y con clientes, mientras la segunda se refiere a la colaboración con competidores y con empresas no competidoras. En la colaboración vertical las empresas comparten responsabilidades, recursos e información del desempeño para servir los clientes finales. La colaboración horizontal ocurre entre compañías al mismo nivel de la Cadena de Suministro; mientras la colaboración lateral es la combinación de los beneficios y las capacidades de las colaboraciones vertical y horizontal (Chan y Prakash, 2012). La combinación de los tipos horizontal y vertical genera la tercera categoría, conocida como Colaboración Lateral, diagonal o sinérgica (Simatupang y Sridharan, 2002; Cruijssen 2006; audy *et al.*, 2010), la cual se produce cuando se combinan los métodos, capacidades y beneficios de las colaboraciones vertical y horizontal (Arango *et al.*, 2013) y tiene como objetivo sincronizar los transportadores y prestadores de servicios logísticos de múltiples compañías, para lograr una red logística efectiva (Cruijssen, 2006).

2.2.1 Colaboración vertical

La colaboración del tipo vertical se da entre empresas que operan en diferentes niveles de la cadena de suministro, involucrando proveedores, productores, centros de distribución, mayoristas, minoristas, clientes y empresas prestadoras de servicios logísticos, mediante la centralización de las decisiones que permitan coordinar el uso de recursos, tecnologías e información (criujssen *et al.*, 2007, Bahinipati y Deshmukh, 2012). El concepto de cadena de suministro en sí mismo es una representación de la colaboración vertical.

Los principales objetivos al formar procesos de colaboración entre empresas de la misma cadena de suministros, son la reducción de costos, mediante la eliminación de desperdicios en las operaciones y la búsqueda de mejorar los niveles de servicio de los clientes o empresas en los escalones superiores.

La colaboración vertical se separa en dos vertientes. La primera tiene que ver con las acciones que buscan mejorar las operaciones de abastecimiento y suministro de materiales, para disminuir los costos de la adquisición de materiales, el inventario y mejorar el servicio al cliente.

La segunda vertiente busca mejorar las actividades de transporte y logística relacionadas, con la intención de disminuir los costos de transporte, las variaciones en el suministro y generar mayor visibilidad en la cadena de suministros (Tan, 2001; Bahinipati y Deshmukh, 2012).

Las acciones de colaboración vertical también pueden diferenciarse dependiendo de las áreas de las empresas involucradas, encontrándose colaboración entre Proveedores-compradores, colaboración en Distribución-inventario y colaboración entre Compra-producción (Adarme, 2012). Derroiche *et al.* (2008) y Holweg *et al.* (2005) establecen que la colaboración en la Cadena de Suministro se ha evidenciado en múltiples conceptos, tales como la Respuesta Rápida (QR), Respuesta eficiente al Cliente (ECR), Política de Reabastecimiento Continuo (CPR), Inventario Manejado por el Vendedor (VMI), Planeación, Pronósticos y Reabastecimiento Colaborativo (CPRF), Respuesta sincronizada al Cliente (SCR), Reabastecimiento Rápido (RR) y Administración del Inventario Centralizado.

2.2.2 Colaboración horizontal

La colaboración horizontal se define como la actividad en la que empresas del mismo nivel en el mercado (Competidores) realizan operaciones concertadas y en coordinación, permitiendo mejorar el desempeño de las empresas participantes mediante la optimización de procesos logísticos que conllevan a un incremento de la competitividad de dichas empresas (Cruijssen, 2007). Las leyes de competencia regulan las posibilidades de colaboración entre empresas competidoras (Article 101 of the Treaty on the Functioning of the European Union (TFEU)) (Unión Europea, 2011), como una medida para evitar malas prácticas entre empresas. Las alianzas estratégicas son un ejemplo de cómo los competidores pueden colaborar (Ashurst 2014). Las prácticas más comunes en la colaboración horizontal son (Unión Europea, 2011):

- Producción Conjunta.
- Especialización.
- Subcontratación.
- Compras conjuntas.
- Ventas, mercadeo y distribución conjuntas.
- Acuerdos de licenciamiento.

- Acuerdos de investigación y desarrollo.
- Acuerdos de estandarización.
- Intercambio de información.

La producción conjunta se refiere a que dos o más competidores pueden utilizar una misma planta para producir de manera conjunta; en la especialización se selecciona la empresa que realiza los productos, de acuerdo con sus capacidades y calidades; La subcontratación busca ampliar la capacidad de oferta de mercancías mediante la contratación de una empresa encargada de producir para ambas partes; las compras conjuntas se refiere a la adquisición de un mismo producto de manera conjunta para obtener economías de escala u otro tipo de beneficios; las ventas, el mercado y la distribución conjunta permite que las empresas utilicen recursos de manera conjunta para realizar el procesos de comercialización; Los acuerdos de licenciamiento permiten que las empresas intercambien y puedan utilizar elementos protegidos con derechos de propiedad intelectual, como software o bases de datos; la investigación y desarrollo permite la elaboración de nuevos productos o la investigación en múltiples áreas de forma conjunta entre las empresas (por ejemplo investigación de mercados); los acuerdos de estandarización conllevan a la generación de normas y patrones para definir procedimientos o características de los productos; y el intercambio de información permite comunicar datos, conocimiento y herramientas entre empresas, con el fin de mejorar sus operaciones.

Con relación a las actividades logísticas que pueden desarrollarse en entornos de colaboración, las más utilizadas en colaboración horizontal entre generadores de carga y prestadores de servicios logísticos (SLP's) son (Criujssen, 2006, Andriolo *et al.*, 2015; Gonzales Feliu, 2012):

- Grupos de influencias (Lobby).
- Grupo de mantenimiento.
- Grupos de compra.
- Chartering (tercerización de ciertas órdenes por medio de competidores).
- Intercambio de almacenes.
- Intercambio de transporte.

- Centros de conocimiento.
- Asistencia en carretera.
- Marcas compartidas.
- Presentación a licitaciones.
- Puesta en común de activos.
- Grupo Intermodal.
- Crossdock compartido.
- Cargas compartidos.

Desde el punto de vista legal, todas estas modalidades tienen restricciones, las cuales deben ser evaluadas previamente por las empresas, de forma que no caigan en incompatibilidades ni en prácticas al margen de la ley (Ashurst, 2014).

La colaboración horizontal, puede darse entre empresas competidoras directas o entre empresas que no tienen negocios relacionados (Hacen parte de diferentes cadenas de suministro) y puede darse de cuatro diferentes formas: Coexistencia, cooperación, competencia y co-opetencia (Criujsen *et al.*, 2007; Leitner *et al.*, 2011).

2.2.3 Otras clasificaciones para los tipos de colaboración

Si bien la clasificación de los tipos de colaboración en vertical, horizontal y lateral es la forma más utilizada para diferenciar los tipos de colaboración entre empresas, algunos autores han propuesto otras maneras de categorizar estos procesos, los cuales son:

- Lambert *et al.* (2004) presenta tres tipos de colaboración dependiendo del nivel de integración entre las empresas.
- Zinn y Parasuraman (1997) clasificaron los procesos de colaboración basado en el alcance y la intensidad. El alcance se refiere al número de servicios y actividades involucrados en la colaboración y la intensidad al nivel de relacionamiento entre las empresas.
- Zhang *et al.* (2008) clasifica la colaboración según los actores involucrados en el proceso: colaboración entre generadores de carga, colaboración entre transportadores y colaboración entre generadores y transportadores.

- Ojeda (2009) clasifica los tipos de colaboración de acuerdo a 9 criterios diferentes, los cuales son: forma en que se vinculan los participantes, naturaleza del marco en el cual se constituyen, naturaleza de los recursos que se comparten, propósito de relaciones, ámbito geográfico, mercado que atiende, tipo de conexión, fortaleza de los vínculos, duración, especificidad de los recursos de la red y su continuidad, y la función del aprendizaje.
- Bendul (2014) clasifica la colaboración en dos grupos: Actividades de orden administrativo y de comportamiento y las de administración técnico y organizacional. Las actividades del tipo administrativo y de comportamiento incluyen los métodos de administración, estructuras de poder y liderazgo, estructuras de riesgo y recompensas, y cultura y actitud. Las actividades de administración técnica y organizacional comprenden la estructura de instalaciones para la información y las comunicaciones, las estructuras de actividades y flujos de procesos, las estructuras organizacionales, los métodos de planificación y control, y las estructuras de instalaciones para el flujo de productos.

2.3 Trabajos de colaboración en logística y cadena de suministro

En la literatura especializada es posible encontrar un gran número de trabajos que tratan el tema de la colaboración entre empresas logísticas. Muchos autores argumentan que a pesar de este gran número de trabajos, todavía el estudio de procesos de colaboración se encuentra en sus primeros pasos (Crujssen *et al.*, 2007; Audy, 2010; Leitner *et al.*, 2011; Cao y Zhang 2013, Jeenanunta *et al.*, 2013, Kaibara de Almeida *et al.*, 2015, Andriolo 2015). Algunos trabajos encontrados en la literatura especializada son:

2.3.1 Trabajos de colaboración vertical en logística y cadenas de suministros

Larsen (2000) propuso un esquema para la planificación y el desarrollo de productos en colaboración, haciendo uso intensivo de las TIC, así como un mecanismo para distribuir los beneficios y los riesgos de forma equitativa. Hoyt y Huq (2000) analizan el proceso de creación de relaciones entre un comprador y un proveedor desde la perspectiva de la teoría de costos de transacción, la aplicación de estrategias de negocio y las teorías de administración de recursos. Sahin y Robinson (2002) analizan el valor que representa para una Cadena de Suministro contar con procesos de intercambio de información y coordinación del flujo físico.

Simatupang *et al.* (2002) adaptan el concepto de mutualismo a la naturaleza de las interdependencias en una cadena de suministro (CS), en donde la coordinación es un prerrequisito para la integración y el logro de los objetivos conjuntos. Larsen *et al.* (2003) sugieren que un proceso de coordinación entre los miembros de una CS es efectuado siempre y cuando dos o más de dichos miembros desarrollen actividades de manera conjunta y construyan pronósticos sincronizados, determinando cuáles procesos de producción y aprovisionamiento deben desarrollarse. Sucky (2005) proponen un modelo de colaboración para la producción y abastecimiento de productos, en el cual en vez de optimizar independientemente las actividades de los clientes y los proveedores, se logre un enfoque coordinado que permita mejorar las condiciones tanto para clientes como para los proveedores, en términos de respuesta al cliente y costos.

Sarmah *et al.* (2006) estudiaron modelos de coordinación utilizando descuentos por cantidad. Shin *et al.* (2009) desarrollaron un modelo de coordinación entre un proveedor y un comprador para determinar descuentos de la cantidad de aprovisionamiento en una cadena de suministro. En el modelo se propone un ajuste de riesgo compartido para el caso en que se presente un excesivo abastecimiento y bajos niveles de demanda a causa de la incertidumbre. Bahinipati y Deshmukh (2012) formularon un modelo para la colaboración en los procesos de abastecimiento entre empresas de una misma cadena de suministros (Proveedor-Comprador). El modelo permite calcular las cantidades de abastecimiento de forma colaborativa, para productos con ciclos de vida corta y en donde la demanda es independiente de los precios de venta.

Otros autores que han trabajado la colaboración en cadenas de suministro son Bell *et al.* (1983); Burns *et al.* (1985); Dror y Ball (1987); Cohen y Lee (1988); Goyal y gupta (1989); Anily y Federgruen (1990); Bhatnagar *et al.* (1992); Chandra (1993); Chandra y Fisher (1994); Kelle *et al.* (2003); Comeaux (2004) y Kelle *et al.* (2007).

2.3.2 Trabajos de colaboración horizontal en logística y cadenas de suministro

Leitner *et al.* (2011) presentan un enfoque de colaboración en que a través de la coordinación de los proveedores para el envío de mercancías permite disminuir los costos de transporte, el número de viajes, el consumo de combustible y las emisiones de CO₂. Este enfoque se basa en

que una empresa prestadora de servicios logísticos se encarga de centralizar las órdenes, a partir de lo cual define las rutas y los medios para el transporte. Wu *et al.*, 2010 y Wilhelm (2011) estudia la colaboración entre múltiples proveedores, la cual es generada por requerimientos de los clientes, al ser estos dominantes debido a su poder de compra. Vornhusen *et al.* (2014) estudian la colaboración entre transportadores, los cuales mediante la utilización de puntos de intercambio de mercancías realizan el ruteo de los productos, basado en un modelo de ruteo de vehículos con transbordos de mercancías y ventanas de tiempo, el cual es resuelto utilizando programación entera mixta.

Caputo y Mininno (1996) estudiaron los procesos de cooperación y colaboración que pueden generarse gracias a la implementación de sistemas y tecnologías de información entre diferentes eslabones de la cadena de suministro (Colaboración vertical), como entre empresas del mismo eslabón de la cadena (Colaboración Horizontal). Desde el punto de vista de colaboración vertical los autores mencionan la posibilidad de trabajar en el intercambio electrónico de datos, el reabastecimiento continuo, el crossdocking, la estandarización de palés y de unidades de embalaje, y el uso de vehículos para abastecer múltiples distribuidores y múltiples clientes. En colaboración horizontal los autores mencionan la estandarización de documentos y sistemas para el procesamiento de órdenes, la estandarización de códigos para productos, embalajes y empaques, el almacenamiento en instalaciones compartidas y la coordinación de envíos de mercancía.

Hageback y Segerstedt (2004) presentaron un enfoque de colaboración para el envío de mercancías en la ciudad de Pajala, en el norte de Suecia. En este modelo, la mercancía es consolidada en un único vehículo mediante la colaboración de los transportadores y clientes, y conectando la ciudad con el centro económico del sur del país, permitiendo disminuir costos de transporte y mejorar el nivel de servicio a los clientes. Frisk *et al.* (2006) estudiaron la colaboración entre empresas para planificar la operación de transporte de forma conjunta, compartiendo vehículos y utilizando los viajes vacíos de retorno (backhauls), con lo cual se logra disminuir los costos de transporte de productos. Los autores proponen además varios modelos para distribuir los beneficios encontrados mediante el proceso de colaboración. Crujssen *et al.* (2007) estudiaron los beneficios y las dificultades en los procesos de colaboración entre empresas prestadoras de servicios logísticos.

Krajewska *et al.* (2008) presenta un modelo para la cooperación entre transportadores, el cual se fundamenta en el modelo MDVRP con ventanas de tiempo, a partir del cual demuestran

que es posible disminuir los costos total de ruteo. Los autores además proponen un modelo para asignar los beneficios obtenidos de forma equitativa para las empresas participantes. Bloss y Kopfer (2011) proponen un esquema para la toma de decisiones en colaboración de transporte, el cual lo estructuran como un problema de dos etapas. En la primera se decide la participación del transportador en el proceso de colaboración y en la segunda la reasignación de la distribución de las mercancías. Hall y Saygin (2012) estudiaron el impacto de colaboración de la información entre empresas del sector retailer, encontrando que el intercambio, la capacidad de manejo y la confiabilidad de información producen impactos positivos en la reducción de los costos y en el cumplimiento de entregas a tiempo.

Li *et al.* (2014) estudiaron las actividades de colaboración que generan resultados exitosos en el mercado para cadenas de suministro basadas en estrategias make-to-order (MTO) y make-to-stock (MTS), encontrando que las actividades clave en la colaboración para estas empresas son la realización de pronósticos colaborativos, la planificación de la producción y las actividades relacionadas con el abastecimiento del inventario. Andriolo *et al.* (2015) proponen un modelo de colaboración horizontal, en el cual dos compradores diferentes acuerdan las cantidades de mercancía a ordenar de distintos proveedores, las cuales son transportadas en un mismo vehículo. Este concepto denominado “Haulage Sharing” generó una reducción en costos y en las emisiones de CO₂ producidas por los vehículos.

2.4 Procesos de colaboración en el inventario

La gestión de los inventarios es una de las áreas de la logística y la cadena de suministro (CS) más estudiadas por la administración de operaciones (Díaz-Batista y Pérez-Armador, 2012), ya que tiene un alto impacto en los costos operacionales de las empresas y es una de las medidas más importantes para evaluar la efectividad de las cadenas de suministros (Fawcett *et al.*, 2010). Dentro de las muchas formas y técnicas que han surgido para la adecuada gestión del inventario, el manejo de inventarios colaborativos aparece como una herramienta útil, no solo para el vendedor sino también para el comprador y para el usuario final (Hugos, 2003; Arango *et al.*, 2010b). Desde el año 1990 se ha observado la consolidación de múltiples estrategias y modelos que buscan el mejoramiento de los sistemas de administración de inventario, como lo evidencia estudios sobre el inventario gestionado por el vendedor (VMI) y la respuesta eficiente al cliente (ECR) (Derroiche *et al.*, 2008; Coronado *et al.*, 2006).

La colaboración en los procesos de manejo de inventarios busca minimizar los costos totales de mantener stocks en las instalaciones de los clientes y proveedores, lo cual se logra encontrando la cantidad óptima de reabastecimiento (Goyal y Yash, 1989), que permita mantener los niveles de materiales en el valor más bajo posible, sin afectar el servicio (Arango *et al.*, 2013). Dependiendo de la estructura de la cadena de suministros, los procesos de colaboración en el manejo de inventarios se desarrollan de manera diferente (Adarme, 2012). Si la cadena de suministros es descentralizada, el primer objetivo de la colaboración debe ser buscar alinear los múltiples objetivos de las partes (Li y Wang, 2007), que en muchos casos son diferentes e inclusive contradictorios; si la cadena es centralizada, el objetivo de la colaboración será la coordinación de las actividades a desarrollar y asegurar un flujo de información efectivo, con lo cual sea posible disminuir los niveles y el costo del inventario.

Varios autores han mencionado la relevancia de realizar procesos colaborativos para la coordinación de los inventarios entre empresas (Goyal y Deshmukh, 1992; Bhatnagar *et al.*, 1992; Whang, 1995; Narus y Anderson, 1996; Lambert *et al.*, 1999).

La colaboración para la reducción de los inventarios incide directamente en la disminución de costos operativos en el sistema y ayuda a la flexibilidad de la empresa (Díaz-Batista y Pérez-Armador, 2012). Para Danese (2006) los beneficios producidos por la colaboración en inventarios son la reducción de los niveles de productos, disminución del número y frecuencia de agotados y el incremento en la disponibilidad de los inventarios a los clientes, lo cual incrementa el nivel de servicio. Singer y Donoso (2007) mencionan que la colaboración en la cadena de suministro produce mayor movimiento del inventario, generando una rotación más alta del capital invertido y aumenta la predictibilidad de la demanda, llevando a procesos de aprovisionamiento más precisos.

Danese (2006) argumenta que la razón por la que se generan estos beneficios, se debe a que la colaboración ayuda a minimizar la distorsión de la información (conocida como efecto látigo) que se transmite desde miembros inferiores de la cadena de suministros. Song y Song (2009) establecen que el mayor impacto de la colaboración en inventarios es la flexibilidad que las organizaciones obtienen para compartir productos. Para esto se requiere el intercambio de información, la implementación de prácticas operacionales entre las empresas y la generación de procesos de alineación de los inventarios para las partes. Zhang *et al.* (2012) establece que

los estudios sobre inventario colaborativo se han centrado en problemas de dos escalones (Proveedor clientes), haciendo todavía insuficiente el conocimiento en la dinámica de colaboración de múltiples niveles.

2.4.1 Estrategias y mecanismos de coordinación de inventarios

Entre las estrategias para la coordinación del inventario presentadas en la literatura se encuentran, el desarrollo conjunto de ordenes (Kim *et al.*, 2002), la respuesta eficiente a clientes (ECR) (Viswanathan y Piplani, 2001; Piplani y Viswanathan, 2004), la planificación, pronóstico y reabastecimiento colaborativo (CPRF) (Fu *et al.*, 2000), Justo a Tiempo (Klastorin *et al.*, 2002), inventario manejado por el vendedor (VMI) (Kwak *et al.*, 2009, Arora *et al.*, 2010, Arango *et al.*, 2011b), el inventario por consignación (Zavanella y Zanoni 2009), entre otros. Estas estrategias son:

- **Estrategia 1. Desarrollo conjunto de órdenes:** el desarrollo conjunto de órdenes se refiere al proceso en el cual varios clientes colaboran entre sí para obtener beneficios o romper las barreras que pueden encontrar en los procesos de compra. En este esquema, los compradores pueden obtener beneficios generados por las economías de escala al comprar grandes cantidades, reducir costos de transporte al coordinar los envíos de forma consolidada, y pueden hacer frente a dificultades económicas para poder adquirir las cantidades mínimas suministradas por los proveedores o a dificultades técnicas para el manejo y conservación de los productos.
- **Estrategia 2. Respuesta eficiente a clientes (ECR):** esta estrategia busca que los proveedores y clientes trabajen de manera coordinada para generar valor agregado a los productos y procesos. EL ECR pretende incrementar la eficiencia de los procesos a lo largo de la cadena de abastecimiento, colocando como prioridad el desempeño global de esta, por encima del correspondiente al de las partes involucradas. Con el ECR se logra realizar respuestas rápidas (eficientes) a los clientes mediante un esquema en que más que una estrategia Push se vuelve un sistema Pull, de forma que la respuesta se da sobre las condiciones reales, lo cual satisface las necesidades de los clientes y disminuye el desperdicio de recursos, como es el caso de los excesos de inventario tanto en las instalaciones de los clientes como en los proveedores.

- **Estrategia 3. Planificación, pronóstico y reabastecimiento colaborativo (CPFR):** esta estrategia permite mediante la colaboración en la cadena de suministros lograr una mejor visibilidad de los procesos y de la demanda, con lo cual se pueden realizar pronósticos de ventas y planes de abastecimiento más ajustados a la realidad, siendo posible sincronizar estas actividades, reduciendo los errores para el abastecimiento y disminuyendo los niveles de inventario requeridos para las partes participantes, entre otros elementos como mejorar el nivel de servicio, mayor velocidad en la respuesta a los cambios e incrementos en ventas.
- **Estrategia 4. Justo a tiempo:** la estrategia justo a tiempo es un modelo (que logra llegar a ser una filosofía de trabajo) en el cual los materiales y recursos requeridos se hacen disponibles únicamente cuando las condiciones de fabricación o abastecimiento van a ser llevadas a cabo. Esta estrategia busca eliminar los desperdicios en la cadena de suministro al disponer únicamente de los recursos necesarios, con lo cual se logra eliminar las cantidades de inventario, las acciones de generación de pedidos y las actividades de transporte innecesarias, tanto para producto en proceso como para producto terminado, en clientes y proveedores.
- **Estrategia 5. Inventario administrado por el proveedor (VMI):** el VMI es una estrategia que permite disminuir los costos y niveles del inventario mediante la centralización de las decisiones de abastecimiento a múltiples clientes, tomadas por el proveedor, lo cual le da el nombre a esta estrategia. En este modelo el proveedor debe conocer las demandas, los niveles de inventarios y la política de reabastecimiento de los clientes, a partir de lo cual realiza los planes de abastecimiento en cantidad y tiempo, para garantizar el mejor sistema de distribución, sin que se incurra en excesos o faltantes de inventario en las instalaciones de clientes y del mismo proveedor. En este sentido el proveedor es el responsable de asegurar los niveles de inventario y determinar las cantidades ordenadas para sus clientes, facilitando la coordinación conjunta de la cadena de suministro (Dong y Xu, 2002).
- **Estrategia 6. Inventario en Consignación:** el inventario en consignación, que puede verse como una extensión del modelo VMI, se refiere a que el proveedor hace disponible el inventario en las instalaciones de los clientes, pero donde la administración del mismo es responsabilidad del primero (proveedor). En este esquema el cliente tiene en

sus instalaciones la mercancía disponible, pero al no ser de su propiedad no incurre en costos de almacenamiento e inventario. El inventario puede ser reducido mediante una adecuada gestión del inventario y cocimiento de la información de consumo, tanto en las instalaciones de los clientes como en la de los proveedores.

La implementación de las estrategias de colaboración en el inventario mencionadas anteriormente, requiere del intercambio eficiente y del manejo adecuado de la información, la coordinación e integración de procesos y métodos y del compromiso e interés de participación de los proveedores y los clientes (Yao y Dresner, 2008).

2.4.2 Colaboración en el inventario y el transporte

Los problemas de coordinación del inventario y el transporte están fuertemente ligados debido a que las mercancías deben ser transportadas para cumplir los requerimientos de demanda. El nivel del inventario está fuertemente relacionado con el transporte, pero también con las condiciones determinadas en el proceso de adquisición de los materiales. Las decisiones de abastecimiento, que determinan la cantidad y el momento de realizar la operación de abastecimiento condicionan el inventario tanto en las instalaciones de clientes y de proveedores. Las estrategias de abastecimiento que implican pocas cantidades de reabastecimiento, conllevan a realizar muchas operaciones de transporte, pudiendo inclusive alcanzar el ideal de tener cero inventario en las instalaciones de los clientes. Sin embargo, aunque el inventario es mínimo en las instalaciones de los clientes, las operaciones de transporte y de despacho de pedido son intensivas, produciendo un gran costo en estas y por ende generando un costo total del proceso de abastecimiento alto.

Los procesos de planificación de la distribución de mercancías deben encontrar las condiciones de abastecimiento, las cuales incluyen la cantidad y el momento para enviar los productos desde los proveedores a los clientes y al mismo tiempo determinar las condiciones de transporte, estableciendo la programación y ruteo de los vehículos. El problema de asignación simultánea del inventario se realiza siguiendo dos tipos de mecanismos: Descomposición y agregación: EL mecanismo de descomposición se refiere a separar el problema en dos fases, en las cuales en una primera instancia se realiza la asignación del inventario y en la segunda la asignación de las rutas para el transporte (Campbell y Savelsbergh, 2004; Kang y Kim

2010). El mecanismo de agregación encuentra la solución al problema de manera simultánea, produciendo las decisiones de inventario y transporte de forma directa.

2.4.3 Modelos de colaboración de inventarios

En la literatura especializada es posible encontrar varios trabajos que estudian el manejo de inventarios colaborativos, los cuales son revisados a continuación.

Fu *et al.* (2000) desarrollaron un marco de referencia para la administración de los procesos de colaboración de inventarios, que se fundamenta en tres etapas: pronóstico colaborativo de la demanda, planificación colaborativa del inventario y proceso de reabastecimiento colaborativo. Kelle *et al.* (2007) elaboraron un modelo de coordinación de inventario que permite calcular la cantidad óptima para el reabastecimiento y número de envíos requeridos, bajo una política de Justo a Tiempo. Este modelo permite considerar el poder de negociación de las partes (empresas que colaboran), lo cual modifica los resultados con respecto a las cantidades y envíos, dependiendo de la parte dominante. Zhang *et al.* (2007) proponen un modelo en el cual se realiza la distribución de un punto a cuatro compradores. Este modelo se fundamenta en diferentes políticas de transporte y se obtienen reducciones en los niveles de inventario.

Jaber y S.K., (2008) estudiaron el proceso colaborativo para la generación de ordenes en una cadena de suministro de tres niveles. Los autores propusieron un modelo que permite determinar las cantidades de pedido para los tres eslabones, a partir del cual logran disminuir los costos de inventario y de generación de órdenes. Dongjie (2009) formuló un modelo para la colaboración entre empresas con la intención de reducir los niveles de inventario y el costo total de las cadenas de suministros de productos pereceros. En este estudio, el autor empleó el modelo CPFR, a través del cual pudo alcanzar los objetivos buscados, mediante la colaboración entre clientes y proveedores.

Kwak *et al.* (2009) desarrollaron un modelo de colaboración de inventario para VMI, que se basa en un sistema de recompensas basado en los resultados de los procesos de reaprovisionamiento de los periodos anteriores (“Actions-rewards Learning”). Zhao y Cheng (2009) proponen dos modelos de decisión para la colaboración en los procesos de reaprovisionamiento entre un centro de distribución y un minorista. En el primer modelo la cantidad de reabastecimiento

que debe enviarse al cliente se toma en una simple etapa, mientras en el segundo modelo se separa la decisión de cuanto enviar y el momento del envío. Ambos modelos producen mejoras con respecto al manejo del inventario de forma independiente por parte del distribuidor y el minorista. Zavanella y Zaroni (2009) presentan un modelo de colaboración de inventario en consignación, en el cual los costos de almacenamiento del proveedor se ven reducidos y ofrece mejores costos para el sistema global proveedor-comprador.

Du *et al.* (2009) desarrollaron un modelo de abastecimiento para productos agrícolas basándose en el enfoque de Planeación, Pronósticos y Reabastecimiento Colaborativo CPFR. Shen *et al.* (2011) desarrollaron un modelo matemático que permite determinar la política de reabastecimiento óptima de productos perecederos para retailers, el cual permite disminuir los faltantes y los excesos de inventarios en esta industria. Yu (2010) elaboró un modelo de colaboración de inventarios de un único vendedor y un único comprador, en el cual se logró alcanzar que ambas partes se favorecieran. Este modelo se realizó para productos deteriorables y considera el incumplimiento de órdenes por condiciones de calidad imperfecta del producto. Kang y Kim (2010) analizan el proceso de coordinación de manera conjunta del inventario y las decisiones de transporte para un sistema de distribución de dos niveles (un comprador con múltiples clientes). Los autores proponen un modelo de fases, a partir de lo cual determinan las cantidades de reabastecimiento y el momento de realizar los envíos a los respectivos clientes.

Hsieh y Laio (2011) propusieron un modelo de optimización multiobjetivo para resolver conjuntamente el problema de la localización y el inventario, bajo el enfoque de VMI. Este modelo fue resuelto mediante la utilización del algoritmo Genético NSGAll. Chan y Prakash (2012) realizaron la simulación de tres modelos de colaboración (Vertical, horizontal y lateral), demostrando un impacto positivo con respecto a los costos de mantener inventario, órdenes atrasadas y los costos de realizar pedidos. Ozen *et al.* (2012) desarrollaron un modelo de colaboración de inventario en un sistema de distribución descentralizado compuesto por una empresa manufacturera, un almacén de distribución y n retailers. La colaboración en este modelo se basa en compartir los pronósticos de la demanda y en elaborarlos de manera conjunta, encontrando resultados positivos en el aumento de las ganancias de la cadena.

Hernández *et al.* (2011) analizaron los procesos de colaboración en la industria de las empresas de transporte con el esquema Less-Than-Truck Load, encontrando que uno de los elementos clave a la hora de decidir hacer parte de un esquema colaborativo son los costos de manejo de inventario en sus instalaciones.

Díaz-Batista y Pérez-Armador (2012) presentaron un modelo de lote económico de pedido (EOQ), en el que se consideran los costos de ordenar y almacenar de manera colaborativa por el comprador y el vendedor, generando reducciones en los costos totales anuales de mantener el inventario. Estos autores también encontraron que el óptimo global obtenido de manera colaborativa puede llevar a afectar el óptimo de alguna de las partes, lo cual hace necesario realizar procesos de negociación que consideren alternativas para aliviar los efectos locales negativos en la organización que se afecte. Yang y Wee (2006) desarrollaron un modelo de coordinación del inventario con porcentajes de reabastecimiento definidos y demanda sensible al precio de los productos. El modelo incorpora un factor de negociación para facilitar el intercambio de las ganancias entre las empresas participantes.

2.5 Colaboración en los procesos de distribución urbana de mercancías

De acuerdo con González-Feliu y Salanova (2012) y Verlinde (2012), se ha hecho imperante encontrar nuevas formas de distribución de mercancías en entornos urbanos que velen por mitigar los impactos negativos del movimiento de vehículos de carga al interior de ciudades y que a su vez sean atractivos económicamente para las empresas que los realicen. Como una alternativa de solución, la colaboración entre actores privados aparece como la estrategia más promisoría en el contexto logístico. Macharis y Melo (2011) mencionan que típicamente los administradores locales se dedican exclusivamente a definir medidas sobre el precio, licenciamiento y restricción del transporte en entornos urbanos, dejando la responsabilidad de ajustar los procesos de colaboración a las empresas privadas (Paché, 2008; González-Feliu y Salanova, 2012).

El proyecto BESTUFS II (2008a) estudia los procesos de transporte de mercancías en entornos urbanos y concluye que se requiere de una amplia colaboración entre las empresas generadoras de carga, los prestadores de servicios logísticos y los transportadores. Kijewska

y Johansen (2014) mencionan que se requiere intensificar las actividades que promuevan una buena colaboración entre los actores de los procesos de distribución de mercancías en las ciudades, con lo cual se puede reducir efectos negativos como el consumo de energía, que está directamente ligado a los costos y a la contaminación ambiental.

Los procesos de colaboración encontrados en la literatura científica se encuentran separados por la naturaleza de los actores involucrados, encontrándose por una parte la colaboración entre los actores gubernamentales y los privados y por otra la colaboración exclusiva entre estos últimos (empresas de transporte, empresas receptoras y originadoras de la carga). Los procesos de colaboración entre administradores y privados tiene como principal interés organizar el flujo de mercancías por lugares determinados de la ciudad, mediante restricciones e implementación de infraestructura que permita mejorar los procesos de transporte, como es el caso de la puesta en marcha de plataformas de logística de ciudad, uso de infraestructura dedicada para el transporte de carga, zonas de aparcamiento/descargas (BESTUFS II, 2008b) y de sistemas de información que permitan el intercambio y conocimiento de información al interior de la ciudad (Aschauer y Starkl, 2010; Björklund y Gustafsson, 2015; Browne y Gómez, 2011).

La colaboración en el transporte urbano de mercancías se puede definir como aquel proceso en que varias empresas comparten vehículos, infraestructura o información, con la intención de que los costos logísticos y los efectos negativos de la distribución de mercancías en las ciudades se vean reducidos para las empresas que interactúan. En la coordinación de acciones para mejorar los procesos de distribución urbana de mercancías, la integración de los actores, tanto públicos como privados, juegan un papel importante. Mientras que el sector público es responsable por la planificación de la infraestructura de la ciudad y las políticas de transporte, el sector privado es responsable de proveer los servicios de transporte, carga y descarga de la mercancía (González-Feliu y Salanova, 2012; González-Feliu *et al.*, 2013).

Adetiloye (2012) argumenta que la colaboración en el contexto de logística de ciudad puede darse desde tres tipos de iniciativas diferentes: Consolidación de mercancías, intercambio de recursos e intercambio de información.

2.5.1 Consolidación de mercancías

La consolidación en los entornos urbanos tiene como objetivo reducir el número de vehículos que entran a la ciudad, mediante el uso de un lugar en que se realiza el agrupamiento de la mercancía (Quak, 2008). Las plataformas de logística de ciudad creados por las administraciones locales pueden verse como una forma de colaboración entre empresas, toda vez que conjuntamente su utiliza un recurso (La plataforma).

Dentro del esquema de la consolidación de la mercancía, las practicas más comunes son las iniciativas de cooperación de transportadores y las iniciativas de consolidación en centros de distribución (Verlinde *et al.*, 2012). Visser (2014) menciona que las posibles opciones para la consolidación son:

- Cooperación entre los originadores de carga para consolidar los envíos.
- Cooperación de receptores para consolidar las entregas.
- Cooperación de los transportadores.

En línea con lo anterior, MDS Transmodal Limited (2012) mencionan que existen tres tipos de consolidación útiles para los procesos de distribución urbana de mercancía:

- Centros de consolidación para tiendas de cadena y productos de consumo en general y los Centros de consolidación de materiales de construcción, en los cuales los productos son llevados desde los proveedores al centro de consolidación ubicados en la periferia de la ciudad, para su posterior distribución a los clientes.
- La consolidación en puntos de recogida, los cuales son lugares ubicados en la ciudad, donde la mercancías de pequeño tamaño son consolidados y a donde los clientes pueden pasar a recoger sus productos. Esta medida reduce el transporte requerido para visitar todas las ubicaciones de los clientes y/o evitar que estos se desplacen grandes distancias para recoger sus mercancías. Esta estrategia de distribución es recomendada para la consolidación de mercancía proveniente del comercio electrónico.

Verlinde *et al.* (2012) presenta una clasificación de los procesos de consolidación usados en la distribución urbana de mercancías mediante procesos de colaboración entre actores

privados, clasificándolas en dos grandes grupos: medidas físicas y de comportamiento. La categoría física incluye las acciones en las que se llevan a cabo intercambio de materiales. La segunda categoría se refiere a aquellos procesos de consolidación en que el transportador, el proveedor o el cliente deben modificar sus procedimientos o procesos internos para realizar una consolidación de la carga.

2.5.2 Intercambio de recursos

Los recursos compartidos en los procesos de colaboración en el transporte de mercancías son de tres tipos: uso compartido de vehículos, de infraestructura y de rutas. Compartir vehículos se refiere a la utilización por parte de varias empresas de una flota de vehículos, los cuales son reservados por el usuario que los vaya a utilizar. Compartir plataformas se refiere al uso de una instalación por parte de diferentes empresas, en las cuales cada organización puede trabajar de manera individual o puede haber una interacción para compartir otros recursos (por ejemplo recursos humanos). La colaboración en rutas, conocido como “pooling”, se refiere al proceso en el cual los vehículos transportan la mercancía de varias empresas que interactúan en el proceso de colaboración, mediante la programación adecuada de las rutas que debe seguir los vehículos para recoger y entregar las mercancías.

El caso de compartir rutas es de especial interés, debido al nivel de coordinación que se requiere para que el proceso de distribución sea eficiente. Este proceso requiere un alto grado de intercambio de información y de programación de actividades para optimizar las rutas, por lo cual los procesos de Pooling generalmente son administrados por una empresa prestadora de servicios de cuarta parte (Fourth Party Logistics – 4PL), que se encarga de gestionar todos los elementos necesarios para que la operación de transporte sea eficiente, incluyendo la coordinación de los transportadores (González-Feliu, 2012).

2.5.3 Intercambio de Información

La información es un pilar fundamental de la colaboración en los procesos de distribución urbana de mercancía, la cual se comparte con dos intenciones: La primera tiene que ver con conocer la información requerida por parte de las empresas que realizan los procesos de colaboración, como es el caso de las demandas de cada cliente. La segunda es conocer el estado del sistema de distribución en tiempo real, lo cual permite modificar las rutas, evitar

congestiones, encontrar lugares de aparcamiento, entre otros elementos, y se puede producir por información compartida desde entidades gubernamentales o por la colaboración de información entre actores privados.

Un elemento fundamental en la colaboración de la información es la confiabilidad de la misma, ya que si alguna de las partes colaboradoras no confía en el manejo de la información, esta no estará dispuesta a colaborar (Mancini et al, 2014). Allal-Chérif y Maira (2011) mencionan que es posible lograr procesos de colaboración en los procesos de abastecimiento de varias empresas, mediante el intercambio de información y de sistemas informáticos, con lo cual se pueden desarrollar procesos administrativos para el abastecimiento conjunto entre empresas. Verlinde *et al.* (2012) argumentan que es posible mejorar los procesos de distribución y disminuir el número de viajes mediante la práctica de elaborar pedidos conjuntos menos frecuentes entre empresas, lo cual se obtiene centralizando las compras de una misma empresa o realizando compras de forma conjunta entre varias compañías.

2.5.4 Otros tipos de colaboración

CIVITAS (2010) propone un conjunto de estrategias para mejorar los procesos de distribución urbana de mercancía que se basan en la colaboración entre los diferentes actores, los cuales son:

- Desarrollo de nuevos servicios.
- Plataformas logísticas con servicios de furgonetas eléctricas compartidas.
- Servicios de entrega a hogares de manera coordinada entre los diferentes actores.
- Desarrollo de tecnologías de la información y la comunicación de soporte.

MDS Transmodal Limited (2012) complementa la propuesta realizada por CIVITAS (2010), incluyendo otras estrategias de colaboración en el transporte urbano de mercancías, que son:

- Elaboración de ordenes colaborativas.
- Consolidación de envíos en plataformas de consolidación y en puntos de recogida.
- Generación de rutas de los vehículos en colaboración entre autoridades locales y transportadores.

Trentini y Malhene (2012) proponen un enfoque en el cual se puede integrar el transporte de pasajeros con el transporte de mercancías para un grupo específico de productos al interior de las ciudades, en el cual mediante la ubicación de puntos de servicio al interior de la ciudad, sea posible transportar no solo personas sino también mercancías.

2.5.5 Colaboración en el manejo de inventario en los procesos de distribución urbana

Múltiples autores han estudiado los procesos colaborativos para la toma de decisiones sobre el manejo de inventarios entre empresas (Zavanella y Zanoni 2009; Kwak *et al.*, 2009; Fawcett *et al.*, 2010; Arango *et al.*, 2011b; Díaz-Batista y Pérez-Armador, 2012; Zhang *et al.*, 2012, Arango *et al.*, 2013), donde el inventario manejado por el vendedor VMI es la estrategia más comúnmente utilizada a nivel empresarial y más estudiada a nivel académico (Abdelmaguid y Dessouky, 2006).

Won et al (2014) y Bertazzi y Esperanza (2013) mencionan la importancia de incluir dentro de los procesos de distribución de mercancía la variable del inventario. Estos autores han estudiado la inclusión de los costos de inventario en las instalaciones de los proveedores y los clientes, como un elemento fundamental dentro de los procesos de optimización de las redes de transporte en la distribución urbana de mercancías, aplicando el modelo del problema de ruteo de inventarios (IRP), el cual se fundamenta en la colaboración entre las empresas, mediante la aplicación del modelo de inventario manejado por el vendedor (VMI) (Archetti *et al.*, 2014; Azuma *et al.*, 2011; Coelho y Laporte, 2013). Este modelo permite reducir los niveles de inventario en las empresas mediante la centralización de la decisión de cuándo y qué cantidad reabastecer a los clientes (Abdelmaguid y Dessouky, 2006).

Otros autores que han trabajado la integración del inventario y el transporte en los procesos de distribución urbana de mercancía mediante la colaboración son Van Anholt et al (2013), Archetti *et al.* (2013) y Won *et al.* (2014), los cuales basan sus trabajos en el enfoque de la colaboración del inventario a través del VMI y el proceso global de distribución lo analizan mediante el modelo IRP.

Si bien los procesos de colaboración en el transporte y el inventario son una temática sobre la que se encuentra gran cantidad de trabajos en la literatura especializada, cuando se estudia la

aplicación de estos elementos en los procesos de distribución urbana de mercancías, el número de esfuerzos encontrados son pocos, limitándose, según lo encontrado tras una revisión bibliográfica exhaustiva, a los trabajos de Van Anholt *et al.* (2013), Archetti *et al.* (2013) y Won *et al.* (2014), mencionados anteriormente. En la literatura es posible encontrar otro tipo de trabajos que intentan incluir el inventario en los procesos de distribución de mercancías, que aunque no son enfoques colaborativos y definidos para una única empresa, permiten abordar la integración de estas variables desde un enfoque más complejo. Estos trabajos, dentro de los que se encuentran los desarrollados por Chang y Yen (2012), Pradhananga *et al.* (2014) y Melián-Batista *et al.* (2014) utilizan procesos de optimización multiobjetivo que incluyen las decisiones de inventario de forma conjunta con el diseño de las rutas para la distribución de mercancías en entornos urbanos.

2.5.6 Trabajos de colaboración en distribución urbana de mercancías

Hageback y Segerstedt (2004) presentaron un enfoque de colaboración para el envío de mercancías en la ciudad de Pajala, en el cual la mercancía es consolidada en un único vehículo mediante la colaboración de los transportadores y clientes, permitiendo disminuir costos de transporte y mejorar el nivel de servicio a los clientes. González-Feliu *et al.* (2010) presentaron un modelo basado en el modelo VRP capacitado de dos escalones para el análisis estratégico del costo de la distribución colaborativa en el contexto de la logística de ciudad, utilizando una plataforma de crossdocking. Thompson y Hassall (2014) desarrollaron un enfoque de colaboración entre clientes, proveedores y transportadores, en el cual la mercancía proveniente de proveedores lejanos es transportada hasta las instalaciones de un proveedor cercano y a partir de allí se distribuye a los clientes, obteniendo ahorros en el costo de distribución.

Aschauer y Starkl (2010) estudiaron el efecto de generar colaboración entre las empresas transportadoras y los administradores de las vías, mediante el intercambio de información de los pronósticos de congestiones en la ciudad de Linz (Austria), reduciendo los costos de distribución y la emisión de sustancias contaminantes. González-Feliu y Salanova (2012) desarrollaron un sistema de información para la evaluación y planificación estratégica de procesos de colaboración en transporte, relacionados con el envío conjunto de mercancía a múltiples receptores. Zhang *et al.* (2014) propusieron un esquema de colaboración entre proveedores, distribuidores, industrias y administradores para la recolección de residuos en ciudades, disminuyendo los costos totales del sistema de recolección.

Taniguchi (2014) presenta el caso de los sistemas de distribución conjunta de mercancías en la ciudad de Motomachi, Yokohama, Japón, en la cual las mercancías de múltiples proveedores son recogidas y llevadas a un centro de consolidación, a partir del cual son enviadas a sus clientes al interior de la ciudad. Mediante este modelo se logró obtener reducciones en los costos de transporte, en el número de vehículos, en el número de conductores, en la contaminación ambiental, en niveles de congestión y accidentes y se aumenta la frecuencia de visita a los clientes, lo cual permite mejorar el servicio y una reducción en los niveles de inventario. Teo *et al.* (2014), a través de la simulación multi-agente, propone un modelo conjunto para la planificación del proceso de distribución al interior de ciudades, a partir del cual los transportadores y las empresas contratantes del transporte ofrecen descuentos a los clientes. Muñoz-Villamizar *et al.* (2015) modelan el proceso de colaboración en el transporte de mercancía con datos de la ciudad de Bogotá (Colombia), en el que las rutas son asignadas de forma conjunta para varias empresas (Colaboración Horizontal), logrando una disminución en los costos de transporte y el número de vehículos.

Van Anholt *et al.* (2013) proponen un modelo de distribución de ciudades que incluye el inventario, basado en el modelo de ruteo de inventario con recogidas, descargas y ventanas de tiempo para el abastecimiento de los cajeros automáticos en ciudades (PDIRPTW). Archetti *et al.* (2013) estudiaron el problema de la entrega de diarios gratuitos (Free Newspaper Delivery Problem - FNDP), en el cual se busca minimizar el número de viajes, la cantidad de productos en las tiendas (nivel de inventario), así como los faltantes (stock-out). Este enfoque combina características de VMI, IRP, producción y distribución de mercancías perecederas. Won *et al.* (2014) presentan el modelo IRP dependiente del tiempo para la distribución de mercancías en contextos urbanos, logrando disminuir los costos de transporte y el número de ventas de tiempo desatendidas.

Este capítulo presentó a modo de resumen los aspectos clave de la colaboración en la cadena de suministro para la distribución de mercancías de forma colaborativa, analizando los elementos encontrados en la literatura científica sobre la colaboración en el inventario y la colaboración en entornos urbanos. A partir de la información estudiada en este capítulo es posible identificar las posibilidades de colaboración entre empresas, con el objetivo de resolver el problema de la distribución urbana de mercancías, encontrando los mecanismos, tipos, condiciones y demás elementos que deben tenerse en cuenta en la formulación de un modelo que permita optimizar dichos procesos de distribución, lo cual es el objeto de estudio de los siguientes capítulos.

3 Modelo genético para la solución de problemas de optimización multiobjetivo

En este capítulo se presenta un modelo de solución para modelos multiobjetivo orientados a la optimización de los costos de inventario y transporte, el nivel de servicio y el número de viajes requeridos en la distribución urbana de mercancías basado en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes, el cual se basa en el algoritmo genético NSGAI (NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II). El capítulo inicialmente presenta una contextualización sobre optimización multiobjetivo, seguido de la descripción del algoritmo NSGAI utilizado para resolver el modelo multiobjetivo presentado en el capítulo 4 y finalmente se describen las características propias del algoritmo genético desarrollado para resolver el problema de optimización estudiado (Modelo genético de optimización).

Los procesos de distribución de mercancías en entornos urbanos requieren evaluar de manera simultánea varias funciones objetivo, lo que hace necesario utilizar técnicas de optimización multiobjetivo con capacidad de resolver problemas complejos, como es el caso del modelo de optimización de la distribución de la mercancía formulado en esta tesis doctoral y que es presentado más adelante en el capítulo 4. Previo a la presentación de algoritmo genético utilizado para la solución del modelo propuesto, es necesario realizar una breve contextualización sobre los métodos de optimización multiobjetivo.

3.1 Optimización multiobjetivo

Los problemas de optimización multiobjetivo (MOP – por sus siglas en Inglés “Multi-Objective Optimization Problem”) se separan de la optimización convencional de un único objetivo, ya

que en la primera generalmente no entrega una única solución. En vez de esto, la MOP genera un conjunto de posibles soluciones, sobre las cuales los decisores deben seleccionar cual adoptar, basado en una evaluación del desempeño de la misma en todos los objetivos. Las soluciones de un problema de optimización multiobjetivo frecuentemente llevan a una familia de puntos óptimos de solución (conocidos como Frontera Pareto), en donde el mejoramiento de un objetivo puede resultar en el decremento de otro o más (Shenfield et al., 2007).

Los puntos óptimos de solución son encontrados mediante el análisis de dominancia de las posibles soluciones al problema de optimización multiobjetivo. Para entender el concepto de dominancia, es necesario considerar que una solución de un problema multiobjetivo corresponde a un vector $u = (u_1, u_2, u_3, \dots, u_n)$ con n el número de funciones objetivos evaluadas. Una solución u se dice que es no dominada por una solución $v = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_n)$ si y solo si en un ejercicio de minimización cada componente de u es menor o igual que el correspondiente componente de v , y al menos existe un componente de u que es menor que el respectivo de v , es decir (González-Álvarez, 2013):

$$\forall_i \in \{1, \dots, n\} : \mu_i \leq \mu_i \wedge \exists i \in \{1, \dots, n\} : \mu_i < \mu_i$$

En otras palabras, una solución no dominada significa que no existe otra solución que mejore su calidad en ninguna función objetivo, sin que al mismo tiempo deteriore la calidad en al menos uno de los otros objetivos. Cada solución no dominada se conoce como solución de Pareto y el conjunto de todos los puntos o soluciones no dominados (o dominantes) forman la Frontera de Pareto.

Gráficamente para la minimización simultánea de dos funciones objetivo, la frontera Pareto puede representarse en un plano de dos dimensiones y para tres es posible extrapolar una superficie que denote dicha frontera. Sin embargo, cuando el número de funciones objetivo supera las tres, es necesario utilizar métodos elaborados para lograr entender el comportamiento de la frontera de Pareto (Tušar y Philipic, 2015; Kurasova et al., 2015).

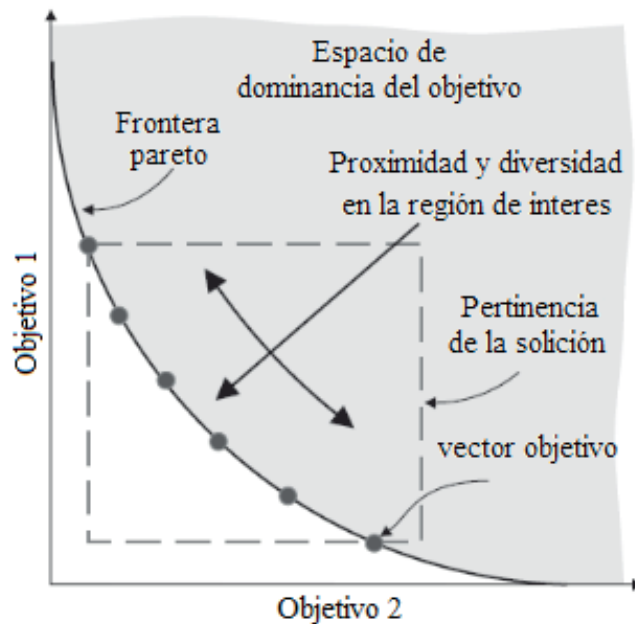
La solución a los problemas multiobjetivo se realiza desde dos tipos de enfoques: el enfoque unidimensional y el enfoque de alta dimensión. El enfoque unidimensional se basa en consolidar (agregar) las funciones objetivo para convertir el problema del tipo mono-objetivo, el cual es resuelto obteniéndose una única solución. Esta agregación se da mediante la ponderación de

los diferentes objetivos y presentando una función objetivo que incluye los objetivos de forma ponderada. El enfoque de alta dimensión se basa en dos fases: en la primera fase se encuentran las soluciones no dominadas, encontradas obteniendo la Frontera Pareto del problema y en la segunda, a partir de las preferencias del tomador de decisiones, se selecciona cual es la mejor decisión para el problema en específico.

Según Shenfield et al. (2007), las métricas más comunes para medir la calidad de la aproximación de la solución en un problema multiobjetivo, tal y como se muestra en la figura 9, son:

- Proximidad: Hace referencia a que tan cerca la una solución está de la frontera de Pareto.
- Diversidad: Es la medida de que tan extenso y uniforme es la distribución del conjunto de soluciones.
- Pertinencia: Mide la pertinencia de las soluciones para el tomador de la decisión.

Figura 9. Medidas de la calidad de soluciones multiobjetivo



Fuente: Shenfield et al. (2007).

Valledor (2015) menciona otras técnicas para medir la calidad de las soluciones, las cuales son: Métricas de espaciado, relación de soluciones no dominadas, Métrica C, Contribución, entropía, Hipervolumen, unary Epsilon, empirical attainment Function y calidad media.

Según Marler y Arora (2004), el problema de optimización multiobjetivo se puede formular de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } F(x) &= [F_1(x), F_2(x), \dots, F_k(x)] \\ \text{Sujeto a } g_j(x) &\leq 0, j = 1, 2, \dots, m \\ h_l(x) &= 0, l = 1, 2, \dots, e \\ x &\in R^n \end{aligned}$$

Donde k es el número de funciones objetivos, m es el número de restricciones del tipo de desigualdad y e el número de restricciones de igualdad. El vector de soluciones (variables de decisión) está representado por X , donde n es el número de variables independientes x_i .

Esta estructura corresponde a la presentada para el modelo de optimización de la distribución de urbana de mercancías basado en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes, propuesto en esta tesis doctoral.

3.1.1 Técnicas de solución a problemas multiobjetivo

Los modelos de optimización multiobjetivo pueden ser resueltos utilizando técnicas convencionales (clásicas) o por técnicas heurísticas (López et al., 2009). Los métodos clásicos operan en dos fases: la primera es la generación de un problema individual a partir del problema multiobjetivo, resolviendo un objetivo a la vez (problema individual), mediante un método de optimización tradicional (Galeano y Montoya, 2008) y la segunda encontrando la solución de los demás objetivos a partir de la hallada en la fase inicial.

Las técnicas Heurísticas más comunes para la solución de problemas de optimización multiobjetivo son (Villalobos, 2005):

- Simulated annealing.
- Genetic algorithms.
- Evolution strategies.
- Evolutionary programming.
- Artificial immune system algorithm.
- Particle swarm optimization.

López et al. (2009) clasifican las técnicas para resolver los problemas multiobjetivo en dos categorías: técnicas de toma de decisión multicriterio (que incluyen las técnicas clásicas) y las

técnicas de optimización multiobjetivo evolutivas: Las primeras se caracterizan por solucionar el problema en dos etapas interrelacionadas: la utilización de una técnica de programación matemática para encontrar el conjunto de soluciones y un método para la toma de decisión de la mejor alternativa. Los métodos evolutivos requieren que después de encontrar el conjunto de soluciones se realice un proceso de selección de las mejores alternativas con base en las preferencias del tomador de decisiones (López et al., 2009).

Las técnicas de toma de decisión multicriterio para solución de problemas multiobjetivo se clasifican de acuerdo al procedimiento (cómo) y al momento en que el tomador de decisiones incorpora sus preferencias para seleccionar la decisión que mejor le represente dentro del conjunto de soluciones optimas (López et al., 2009). La tabla 6 presenta los métodos de solución de problemas multiobjetivo de acuerdo con la clasificación propuesta por López et al. (2009).

Tabla 6. Clasificación de las técnicas de toma de decisión multicriterio

Clasificación	Técnicas
Técnicas en que las preferencias se indican antes de la búsqueda de las soluciones	Goal Programming
	Goal-Attainment Method
	Lexicographic Method
Técnicas en que las preferencias se indican durante la búsqueda de las soluciones	Linear Combination of Weights
	Normal Boundary Intersection
	ϵ -Constraint Method
	Method of Weighted Metrics
Técnicas en que las preferencias se indican después de la búsqueda de las soluciones	Method of Geoffrion-Dyer-Feinberg (GDF)
	Tchebycheff Method
	Reference Point Methods
	Light Beam Search

Fuente: López et al. (2009).

López et al. (2009) establecen que varios autores han identificado inconvenientes en los métodos convencionales para resolver problemas de optimización multiobjetivo, tales como:

- Requieren un alto número de corridas (iteraciones) para encontrar un elemento de la frontera de Pareto.
- Muchos de estos métodos requieren conocimiento del dominio del problema para ser solucionado.
- Algunos de estos métodos son sensitivos (la solución se ve afectada) por la forma o la continuidad de la frontera de Pareto.

- A medida que aumenta el número de objetivos y la complejidad de las funciones que los representan, el problema de encontrar una solución satisfactoria de forma rápida se vuelve incrementalmente complejo (Fonseca y Fleming, 1995).

Los algoritmos evolutivos son métodos de búsqueda estocásticos que permiten encontrar soluciones a problemas matemáticos, trabajando con una población de individuos que representan un conjunto de soluciones candidatas. Esta población es sometida a diferentes transformaciones y después a un proceso de selección que favorece a los mejores. Cada ciclo de transformación y selección constituye una generación. Después de determinado número de generaciones se espera que el mejor individuo de la población esté cerca a la solución óptima del problema. En los algoritmos evolutivos se producen cambios en nuevas generaciones a través de la mutación, pero estas generaciones pueden darse por mecanismos de recombinación o sobre-cruzamiento, como es el caso en los algoritmos genéticos.

La optimización multiobjetivo con algoritmos evolutivos no garantiza que se encuentre la verdadera frontera de Pareto óptima, sin embargo, en vez de esto se encuentra una solución razonablemente aproximada en un tiempo de búsqueda (tiempo de computo) aceptable (López et al., 2009). Los principales algoritmos evolutivos que permiten resolver problemas multiobjetivo son (López et al., 2009):

- MOGA - Multi-Objective Genetic Algorithm.
- NSGA y NSGA-II- Nondominated Sorting Genetic Algorithm.
- SPEA y SPEA2 - Strength Pareto Evolutionary Algorithm.
- PAES - Pareto Archived Evolution Strategy.
- PESA - Pareto Envelope-based Selection Algorithm.

En optimización multiobjetivo, los algoritmos evolutivos son especialmente adecuados debido a que operan sobre un grupo de posibles soluciones (la población de individuos), permitiendo generar varios elementos del conjunto óptimo de Pareto (al menos una buena aproximación de estos). Además, los algoritmos genéticos para la optimización multiobjetivo, en comparación con los métodos tradicionales de programación matemática, son menos susceptibles a la forma y continuidad de la frontera de Pareto, requieren poca información del dominio y son relativamente fáciles de usar e implementar (López *et al.*, 2009).

Para Fonseca y Fleming (1995) y Tiwari *et al.* (2002) los algoritmos y las técnicas evolutivas han demostrado ser una herramienta que se ajusta bien a la solución de problemas multiobjetivo, dado la habilidad de manejar problemas complejos, involucrando características tales como discontinuidades, multimodalidad, espacios factibles discontinuos y funciones de evaluación ruidosas. Vergidis *et al.* (2012) argumentan que estos algoritmos son aplicados exitosamente para resolver varios problemas combinatorios. Moon y Seo (2005) mencionan que el atributo más atractivo de los algoritmos evolutivos es la flexibilidad de trabajar múltiples funciones utilizando pocos requerimientos matemáticos. Por su parte Wang *et al.* (2004) argumentan la capacidad de estos algoritmos para resolver las dificultades de cómputo en procesos de optimización no lineal, no convexa y discontinua.

Además de los métodos tradicionales y evolutivos mencionados anteriormente, existe otro conjunto de técnicas meta heurísticas que pueden ser utilizados para resolver problemas de optimización multiobjetivo. González (2013) realizó una descripción de las técnicas metaheurísticas utilizados exitosamente para optimización multiobjetivo, encontrando algunas que no corresponden a los algoritmos evolutivos, las cuales son:

- Búsqueda de Entorno Variable Multiobjetivo (Multiobjective Variable Neighbourhood Search - MO-VNS).
- Evolución Diferencial con Torneos de Pareto (Differential Evolution with Pareto Tournaments - DEPT).
- Algoritmo Multiobjetivo de Enseñanza-Aprendizaje (Multiobjective Teaching-Learning-Based Optimization - MO-TLBO).
- Colonia Artificial de Abejas Multiobjetivo (Multiobjective Artificial Bee Colony - MOABC).
- Algoritmo Multiobjetivo de Búsqueda Gravitacional (Multiobjective Gravitational Search Algorithm - MO-GSA).
- Algoritmo Multiobjetivo de las Luciérnagas (Multiobjective Firefly Algorithm - MO-FA)
- Algoritmo Multiobjetivo de las Ranas Saltarinas (Multiobjective Shuffled Frog Leaping Algorithm - MO-SFLA).
- Colonia Artificial de Abejas Multiobjetivo con evolución.

Debido a los beneficios mencionados sobre el uso de algoritmos genéticos para la solución de problemas de optimización multiobjetivo, para el modelo de optimización presentado en el capítulo 4 se utiliza el algoritmo NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGAI), el cual ha sido probado exitosamente en problemas de optimización de este tipo (Arango *et al.*, 2015; Iopéz *et al.*, 2009; Li y Zhang 2009; Köppen y Yoshida, 2007).

3.2 Algoritmo NSGAI para la solución del modelo propuesto

El algoritmo NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II (NSGAI) es uno de los algoritmos evolutivos de optimización multiobjetivo más relevantes encontrados en la literatura científica, el cual fue propuesto por Deb *et al.* (2002), y se basa en el Algoritmo Genético de Sorteo de No-Dominancia (NSGA) desarrollado por Srinivas y Deb (1994). El algoritmo NSGAI mejora los inconvenientes encontrados en el NSGA, el cual requiere un número elevado de repeticiones de clasificación. El algoritmo NSGAI utiliza el concepto de NO-dominancia y el concepto de distancia de agrupamiento (Crowing Distance), mediante la cual permite comparar los individuos no dominados mediante una función de su dispersión en el espacio de solución.

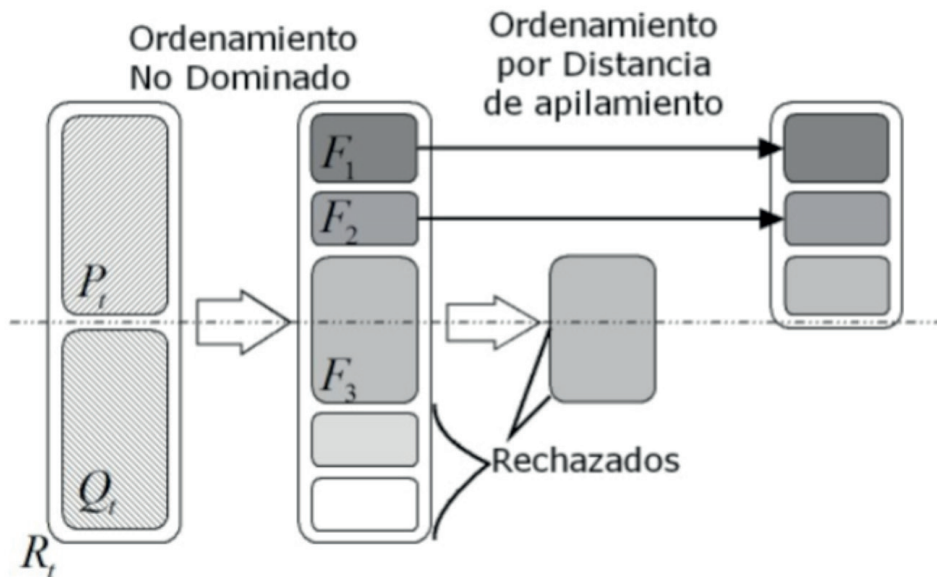
El algoritmo NSGAI a diferencia de muchos algoritmos evolutivos tiene la capacidad de trabajar fácilmente con la clasificación de los individuos de acuerdo al criterio de no-dominancia, previene la pérdida de buenas soluciones debido a que constantemente evalúa los nuevos individuos y los antiguos y contempla el concepto de diversidad entre los individuos de las soluciones. El algoritmo NSGAI además tiene la capacidad de trabajar en espacios de solución complejos y de encontrar regiones del espacio de solución donde un mínimo puede ser identificado con un moderado nivel de precisión (Ahmadi y Barna, 2015)

En el algoritmo NSGAI (NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II) primero se crea una población inicial P_0 de tamaño N de forma aleatoria, la cual es organizada de acuerdo a la no dominancia de las soluciones, proceso realizado mediante un procedimiento iterativo en el cual diferentes niveles de no-dominancia son determinados (Fronteras de Pareto obtenidas al separar las soluciones no dominadas del resto y volver a realizar el proceso de determinación de no dominancia con las restantes), junto con las soluciones que componen dichos niveles (Deb *et al.* (2002), Correa *et al.* (2008). A partir de esta población se origina una población parcial Q_0 de tamaño N (Offspring) mediante el uso de los operadores de selección, cruce y mutación determinados. En esta y en generaciones sucesivas y posteriores, llámese la

población de padres P_t y la población descendiente Q_t . Estas poblaciones son combinadas para formar una población R_t de tamaño $2N$, con lo que se asegura el elitismo en el algoritmo, la cual es ordenada de acuerdo a los niveles de no-dominancia.

A partir de los diferentes niveles de no-dominancia (fronteras Pareto) de la población R_t , la población para la nueva generación se construye incluyendo (acomodando) los individuos en los mejores niveles de no-dominancia (Primeras fronteras Pareto). Sin embargo, como el tamaño de la nueva población es N y de R_t es $2N$, no todos los individuos pueden ser tenidos en cuenta, por lo cual aquellos niveles de no-dominancia que no pueden ser incluidos en la nueva población desaparecen. Un caso particular se da cuando se acomoda el ultimo nivel de dominancia en la nueva población, ya que este nivel puede exceder el tamaño N de la nueva población, lo que hace necesario un mecanismo de selección de aquellos individuos del ultimo nivel a acomodar. Para escoger estos individuos se utiliza una función de selección basada en la dispersión de las soluciones, de forma que aquellos individuos que estén más dispersos de los otros, son los que serán seleccionados para hacer parte de la nueva población. Lo anterior se realiza con el objetivo de brindar mayor capacidad de búsqueda del algoritmo, al preferir individuos en zonas menos pobladas del espacio de solución y por encima de métodos aleatorios para su selección (Deb *et al.* (2002), Correa *et al.* (2008). El esquema de creación de las nuevas poblaciones es presentado en la Figura 10.

Figura 10. Procedimiento del algoritmo NSGA II.

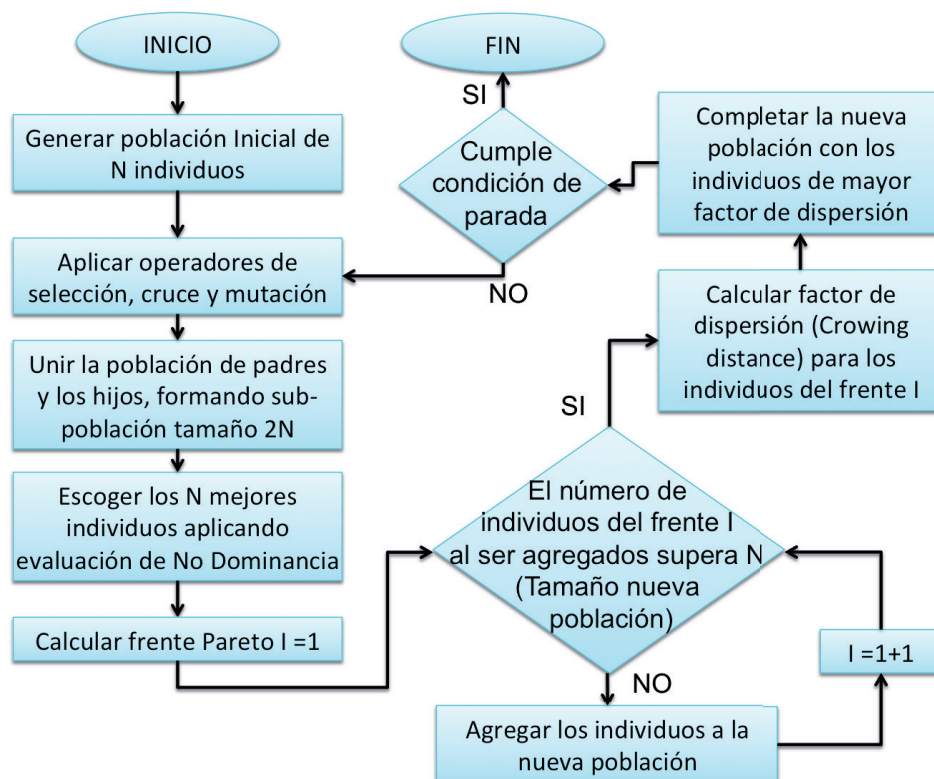


Fuente: correa et al. (2008) adaptado de Deb et al. (2002)

3.3 Modelo genético multiobjetivo de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes

El algoritmo genético con las condiciones del modelo de optimización matemática de la distribución urbana de mercancías desarrollado en esta tesis doctoral se basa en el algoritmo NSGAI. El modelo genético es diseñado especialmente para la solución del problema multiobjetivo estudiado y debido a su fundamento en el NSGAI requiere la ejecución de mecanismos de conformación de poblaciones internas, evaluación de la No-Dominancia de las soluciones y de la conformación de múltiples fronteras de No-Dominancia. El algoritmo también requiere de los demás elementos clave de la formulación de un algoritmo genético, como lo son la representación del cromosoma, los operadores de selección, cruce y mutación, la evaluación de las funciones de actitud y la condición de terminación del algoritmo. Considerando todos los elementos que deben incluirse en el algoritmo NSGAI para la solución del problema de optimización multiobjetivo, el modelo genético utilizado en esta tesis doctoral puede representarse gráficamente como se muestra en la figura 11.

Figura 11. Esquema del algoritmo NSGAI utilizado



Fuente: Elaboración propia.

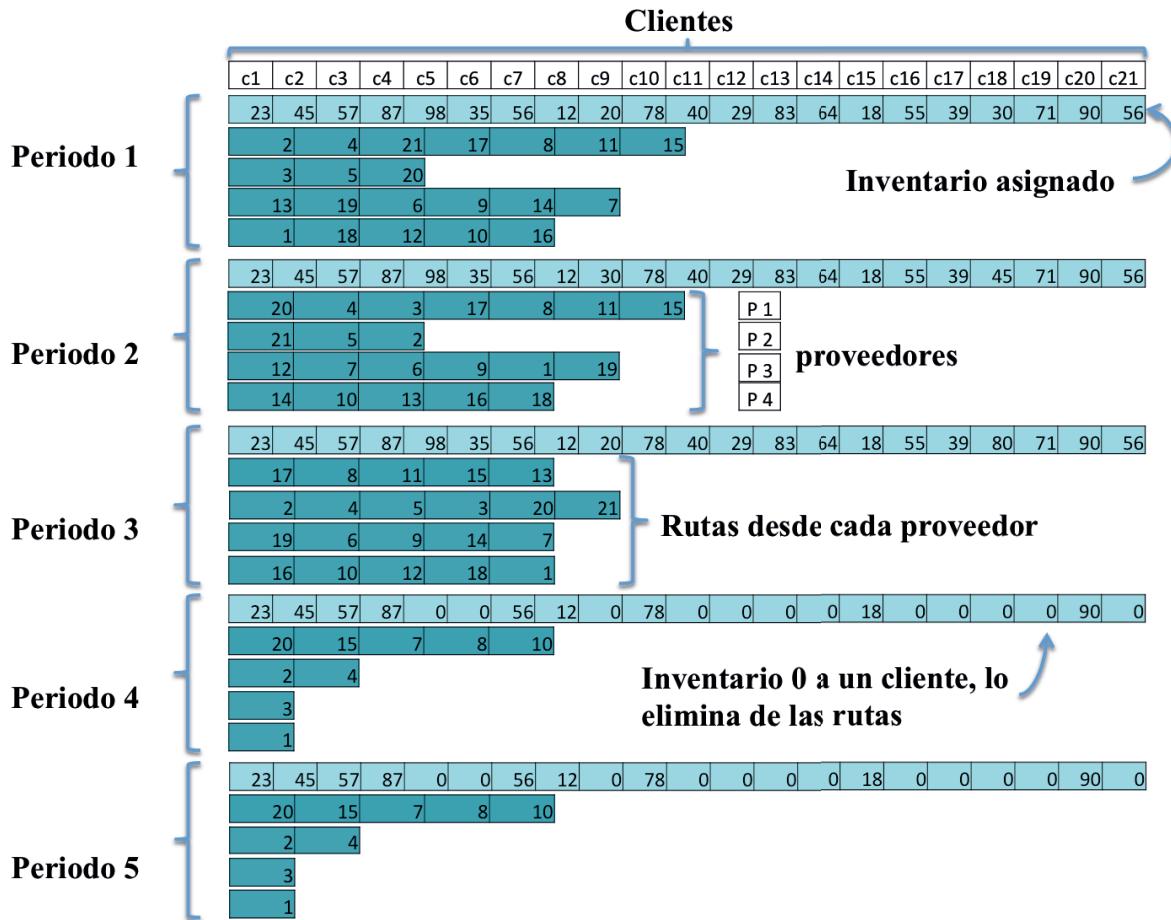
3.3.1 Representación del Individuo (cromosomas) y generación de la población inicial

La representación del individuo (o cromosoma) utilizada en el algoritmo NSGAI1 para el problema multiobjetivo estudiado se presenta en la Figura 12, que incluye 21 clientes, 4 proveedores y 5 periodos, en el cual de forma simultanea se asigna el inventario a abastecer a cada cliente y las rutas que deben seguirse para atender a los clientes a partir del proveedor (secuencia de genes). Un valor de cero en el inventario significa que no se asigna inventario a dicho cliente, por lo cual de la ruta desde el respectivo proveedor es eliminado, mientras que un cero en los proveedores corresponde a una visita al proveedor. La variable tiempo no se considera directamente en el cromosoma, ya que esta se calcula internamente con la secuenciación de las rutas, los datos de la matriz de distancias y los tiempos de atención requeridos en cada cliente.

La asignación de los clientes a los proveedores se realiza mediante un procedimiento de agrupamiento (formación de Clúster), la cual se realiza utilizando el criterio de menor distancia a los proveedores, es decir, los proveedores atienden los clientes que se encuentran más cercanos a estos. Para determinar la distancia entre los clientes se utilizó la fórmula de distancia euclidiana entre dos puntos $p_1(x_1, y_1)$ y $p_2(x_2, y_2)$ correspondiente a $\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}$. La formación de clúster utilizando el criterio de proximidad calculado con la distancia euclidiana es el método mas utilizado en el tratamiento de problemas de ruteo de vehículos (VRP) y de ruteo de inventario (IRP) (Ramkumar *et al.*, 2012; Noor y Shuib, 2015).

La población inicial es generada de acuerdo al tamaño (número de individuos) establecido, para lo cual la asignación del inventario se realiza utilizando la política de inventario definida, que consiste en enviar mercancía a cada cliente si únicamente este lo requiere, para lo cual se asigna de forma aleatoria una cantidad comprendida entre lo que cada cliente requiere para abastecer la demanda y la cantidad máxima de mercancía que puede almacenar (inventario Máximo). Una vez las cantidades de inventario son definidas, se realiza la asignación de los clientes a los proveedores, utilizando el procedimiento de formación de clúster descrito anteriormente.

Figura 12. Cromosoma para resolver el modelo MO propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2 Operador de selección

El operador de selección se realiza mediante el torneo de dos individuos seleccionados aleatoriamente, los cuales son comparados utilizando el criterio de dispersión (Crowding Distance) (Deb *et al.*, 2002), con lo cual el individuo de mejor dispersión es seleccionado para las operaciones de cruce y mutación. En caso de que la dispersión sea igual para los individuos se selecciona uno de los dos de forma aleatoria.

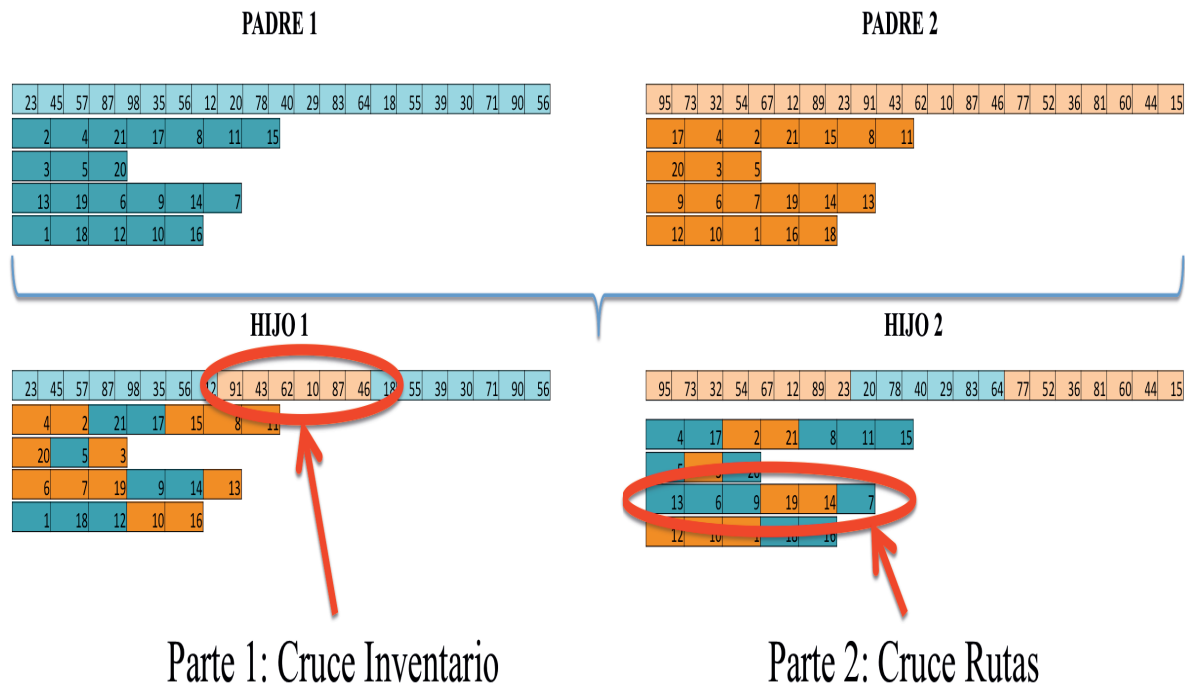
Realizar la selección con base en el criterio de dispersión puede parecer equivocada ya que se omite el criterio de No-dominancia de los individuos. Sin embargo, debido a que el algoritmo conforma las poblaciones con base en la No-dominancia, utilizar este concepto para la selección de individuos no puede aplicarse cuando en la población existen más de una solución No-dominada, ya que debido a su naturaleza estas no pueden ser comparadas entre

si bajo el concepto de No dominancia. De esta forma, la mejor manera de realizar la selección es mediante la comparación del criterio de dispersión, ya que las poblaciones siempre estarán conformadas por los individuos No-dominados.

3.3.3 Operador de cruce

El cruce entre individuos se compone de dos etapas de forma similar a lo establecido en Cho *et al.* (2014) y Arango *et al.* (2015b). En la primera etapa se realiza el cruce únicamente para la parte del cromosoma que corresponde a las cantidades asignadas para enviar a los clientes. En esta parte el cruce se realiza mediante el intercambio de las cantidades del inventario asignado utilizando el método de dos puntos. Los puntos de cruce se obtienen de forma aleatoria para cada operación. La segunda etapa del operador de cruce se encarga de combinar las rutas de distribución definidas en cada proveedor, lo cual se realiza nuevamente utilizando el método de dos puntos. La figura 13 esquematiza el operador de cruce para el periodo I de un par de individuos, tal y como es utilizado en el algoritmo NSGAll para el problema multiobjetivo estudiado.

Figura 13. Representación del operador de cruce.



Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el cruce de los individuos, un algoritmo se encarga de organizar y reparar las rutas, de forma que los vehículos visiten un cliente sí y solo sí para éste hay asignado una cantidad de inventario en los periodos correspondientes, generando rutas factibles.

3.3.4 Operador de mutación

De manera similar a lo descrito para el operador de cruce y con base en lo propuesto por Won *et al.* (2014) y Arango *et al.* (2015b), la mutación se realiza en dos etapas: la mutación de las cantidades asignadas a los clientes y a las rutas. En la etapa 1, para el inventario y para cada periodo, de forma aleatoria se selecciona un cliente, al cual su cantidad asignada se modifica aleatoriamente entre cero y la cantidad que se requiere para que dicho cliente alcance su nivel máximo de inventario. La cantidad de mercancía del cliente seleccionado en la mutación es compensada en los otros periodos, lo cual asegura el cumplimiento de la demanda y descarta un exceso de inventario en el cliente a lo largo del horizonte de tiempo.

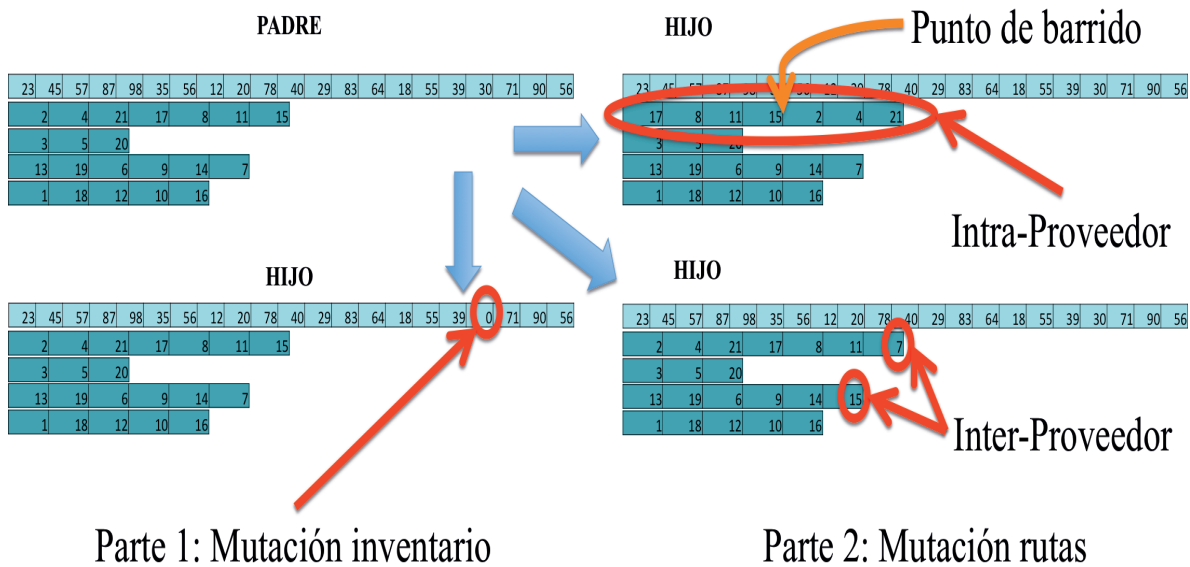
En la etapa dos, las rutas son mutadas mediante dos mecanismos: mutación en las rutas del proveedor (intra-proveedor) y mutación en las rutas entre diferentes proveedores (inter-proveedor). La mutación intra-deposito se encarga de mutar aleatoriamente las rutas de cada depósito utilizando el método de barrido de un punto. El punto de mutación es seleccionado de forma aleatoria. La mutación inter-proveedor se encarga de mutar las rutas entre diferentes depósitos, lo cual se hace cada diez veces que se realiza el proceso de mutación intra-proveedor. La mutación inter-proveedor combina los clientes de diferentes proveedores de forma aleatoria, como un mecanismo para ampliar la búsqueda de mejores individuos en el espacio de solución. El operador de mutación descrito se presenta en la figura 14 para un periodo del individuo.

Cuando se realiza cualquiera de las etapas del operador de mutación, el cromosoma es ajustado para asegurar rutas factibles en la distribución de las mercancías.

3.3.5 Otros elementos del algoritmo NSGAIII propuesto.

La evaluación de las funciones de aptitud (Fitness) para cada uno de las funciones objetivo se obtiene mediante la evaluación directa de su ecuación, como se presenta en el capítulo 4. Las funciones objetivo no debieron ser transformadas para su aplicación en el algoritmo y el análisis de no dominancia y el cálculo de la distancia de agrupamiento se realiza de acuerdo a lo presentado en Deb *et al.* (2012).

Figura 14. Representación del operador de mutación



Fuente: Elaboración propia.

Como condiciones de parada del algoritmo se utilizan dos: EL primero que los individuos de la frontera de solución no cambien durante más de 100 evoluciones y el segundo es terminar cuando se alcance un número de evoluciones determinado. Según la experiencia de corrida del algoritmo, el criterio más utilizado es el del número de evoluciones, ya que las variaciones en el número de individuos y los valores de los mismos no son relevantes y por el contrario aumentan considerablemente el tiempo de procesamiento.

EL algoritmo es corrido utilizando una población de 200 individuos, una probabilidad de mutación de 20% y utiliza elitismo, toda vez que el algoritmo NSGAll combina la población de padres con la población de descendientes y a partir de esta y mediante el análisis de dominancia, produce las nuevas generaciones, tal y como se muestra en la figura 10.

En este capítulo se presentó el algoritmo genético NSGAll propuesto para resolver el problema de optimización simultanea de los costos de transporte e inventario, el nivel de servicio y el número de viajes requeridos para la distribución de mercancías en entornos urbanos, (modelo genético), el cual según lo encontrado en la literatura especializada es innovador, ya que propone una representación de los individuos que no ha sido utilizada previamente en ningún trabajo publicado e incluye elementos que no han sido tratados en conjunto en ningún otro trabajo académico o científico.

En el capítulo 4 se presentará la descripción del modelo multicapa para optimización multiobjetivo de la distribución urbana de mercancías, el cual incluye tanto elementos operativos, como tácticos y estratégicos, de forma que además de optimizar la asignación de las rutas y el inventario para la distribución de mercancías, se contemplen elementos estructurales de la colaboración que permitan formar lazos de integración más fuertes y duraderos entre las empresas.

4 **Formulación del modelo para la distribución urbana de mercancías basado en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes**

En este capítulo se formula el modelo para la distribución colaborativa de mercancías entre múltiples empresas, el cual contempla los tres niveles decisionales de las empresas (estratégico, táctico y operativo) con el objetivo de que el proceso de colaboración contemple no solo elementos operativos de la programación conjunta de las rutas y la asignación del inventario, sino que considere elementos direccionales y administrativos que permitan que los procesos de colaboración se estructuren en un verdadero proceso de integración entre las empresas, que perdure y sea sostenible en el tiempo. El capítulo se estructura en tres subcapítulos: el primero presenta los elementos clave para la formulación del modelo; en el segundo se formula el modelo multicapa para la optimización multiobjetivo de la distribución urbana de mercancías basado en inventarios colaborativos de m proveedores y n clientes; el tercer subcapítulo presenta el modelo operativo para la asignación del inventario y las rutas que optimizan las funciones objetivo establecidas, el cual requiere del proceso de solución presentado en el capítulo anterior.

El modelo formulado en este capítulo, mediante el cual es posible optimizar los costos de transporte e inventario, el nivel de servicio y el número de viajes requeridos en la distribución urbana de mercancías, se basa en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes, y representa un nuevo aporte al conocimiento en el área de la logística y la administración de la

cadena de suministros, ya que los modelos previos no incluyen conjuntamente los elementos de colaboración en el inventario, la configuración de redes de múltiples clientes con múltiples proveedores y el grupo de funciones objetivo utilizadas para la optimización de la distribución urbana de mercancías. Después de una revisión exhaustiva de la literatura especializada, se encontró que previamente no ha sido publicado un modelo para la distribución urbana de mercancías con estas características, que incluya aspectos económicos, de servicio y de mejora de las condiciones de movilidad de la ciudad, demostrando el carácter inédito del modelo formulado en esta tesis doctoral.

4.1 Requerimientos para la estructuración de un modelo para la optimización de la distribución de mercancías basado en inventarios colaborativos de m proveedores y n clientes

En la formulación de un modelo de distribución urbana de mercancías que permita la optimización de la operación de transporte basado en la colaboración entre las empresas involucradas, es necesario considerar elementos de los tres niveles de decisión, con lo cual se asegure la representación integral de las empresas y su interés de relacionarse, tanto desde el punto de vista operativo, administrativo y estratégico. Los elementos requeridos para la formulación del modelo de distribución urbana de mercancías en cada uno de los niveles decisionales son:

4.1.1 Elementos desde el punto de vista estratégico

Desde el nivel estratégico, en el cual se direcciona las organizaciones y se toman decisiones a largo plazo, se requiere considerar la configuración de la red de distribución y el mecanismo y tipo de colaboración a implementar. Cada uno de estos elementos es mencionado a continuación.

Configuración de la red de distribución: El modelo a formular se basa en la colaboración de las empresas, por lo cual el primer elemento a considerar es el número y los actores a participar el proceso de distribución urbana. Debido a que el modelo se fundamenta en la colaboración de empresas, las posibilidades de actores a hacer parte en el mismo son:

- Transportadores.

- Receptores.
- Originadores.
- Prestadores de servicios logísticos.
- Prestadores de servicios de comunicación.
- Gobierno.
- Ciudadanía.

Mediante la definición de los actores a participar en el proceso de colaboración, se debe definir una relación contractual entre los participantes de la red de colaboración, con lo cual se asegure que todas las partes velen por el interés general del sistema, por encima de los beneficios particulares.

El segundo elemento a considerar es el mecanismo de colaboración a conformar por parte de las empresas. De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, los posibles mecanismos son:

- Fusiones entre empresas.
- Absorciones de otras empresas.
- Establecimiento de asociaciones de empresas.
- Coaliciones Alianzas estratégicas - Join Ventures (de diferentes intereses como financieras, operativas, de mercado, de recursos humanos, administrativas).
- Cooperación interempresarial.
- Cadenas productivas.
- Cadenas de suministro.
- Relaciones de profesionales.
- Comunidad virtual de profesionales.
- Negociación colaborativa de contratos.
- Redes empresariales (red central, red celular, club de proveedores y redes multipolares).
- Consorcios.

- Zonas de producción (Breeding environments): clusters industriales, distritos industriales, ecosistemas de negocios.
- Establecimiento de asociaciones de empresas.
- Ampliación del ámbito de actuación de las empresas a todo el mundo.
- Redes de colaboración.
- Gobiernos virtuales colaborativos e-government.
- Empresas, organizaciones y redes virtuales.
- Creación de redes de empresas virtuales.
- Empresas extendidas.

Una vez se seleccione el mecanismo de colaboración, es necesario determinar el tipo de colaboración a utilizar. En este caso se utiliza la clasificación que divide los tipos de colaboración en horizontal, vertical y lateral. Con respecto a la colaboración horizontal es imperante la colaboración entre clientes, proveedores y transportadores. Cada uno de estos actores debe colaborar con sus competidores para producir menores costos y mejores niveles de servicio. Con respecto a la colaboración vertical, se requiere que las empresas de diferentes eslabones colaboren entre sí, para suministrar información de la demanda, cantidades de inventario, costos de almacenamiento. Si ambos tipos de colaboración son llevados a cabo, el tipo de colaboración es lateral.

4.1.2 Elementos desde el punto de vista táctico

En este nivel de decisión se debe buscar la disminución de los costos logísticos de transporte e inventario, maximizar el nivel de servicio y minimizar el número de viajes. Esto corresponde los objetivos del modelo a formular y para lo cual se deben contemplar varios elementos con el fin de definir el camino para lograrlo. Con el objetivo de mitigar los efectos de la distribución de la mercancía en entornos urbanos en las ciudades (enfoque de logística de ciudad), se debe proponer un sistema de distribución que disminuya la congestión, por lo cual entre los objetivos del modelamiento se debe buscar un proceso de transporte que disminuya el número de viajes y/o el número de vehículos.

Luego de la decisión estratégica sobre realizar colaboración vertical, horizontal o lateral, se debe determinar los elementos incluidos en la colaboración entre las empresas, las cuales principalmente se enmarcan en los tipos y formas de colaboración presentados en la tabla 7.

Tabla 7. Tipos y formas de colaboración.

Forma de colaboración	Colaboración vertical	Colaboración horizontal
Colaboración en transporte.	<ul style="list-style-type: none"> • Definición de políticas de transporte conjunto (selección medio de transporte, transporte propio o contratado, tamaños de carga y frecuencia de envíos). 	<ul style="list-style-type: none"> • Ventas, mercadeo y distribución conjuntas • Grupos de influencias (Lobby). • Grupo de mantenimiento. • Chartering (tercerización de ciertas órdenes por medio de competidores). • Intercambio de transporte. • Asistencia en carretera. • Grupo Intermodal. • Crossdock compartido. • Cargas compartidas (carga de varios clientes en un mismo vehículo -pooling).* • vehículos compartidos (vehículos compartidos para el transporte de un cliente*) • Organización de servicios de entrega a hogares* • Generación de rutas colaborativas*
Colaboración en inventario.	<ul style="list-style-type: none"> • Reaprovisionamiento colaborativo • tamaño óptimo de la orden • inventarios conjuntos • Respuesta eficiente al Cliente (ECR) • Política de Reabastecimiento Continuo (CPR), • Inventario Manejado por el Vendedor (VMI) • Administración del Inventario Centralizado. • Inventario en Consignación • Justo a tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Compras conjuntas • Grupos de compra. • Inventarios conjuntos • Desarrollo conjunto de órdenes • Inventario administrado por el proveedor (VMI) • Inventario en Consignación

4. Formulación del modelo para la distribución urbana de mercancías basado en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes

Forma de colaboración	Colaboración vertical	Colaboración horizontal
Colaboración en instalaciones	<ul style="list-style-type: none"> Utilización de instalaciones compartidas 	<ul style="list-style-type: none"> Intercambio de almacenes Puesta en común de activos instalaciones compartidas para actividades logísticas orientadas al producto y el movimiento de materiales (empaquetado, manipulación, producción, distribución, almacenamiento y transporte de mercancías) Crossdocking conjunto Plataformas logísticas de ciudad* Infraestructura dedicada para el transporte de carga, zonas de aparcamiento/descargas* Consolidación en puntos de recogida*
Colaboración en administración	<ul style="list-style-type: none"> Planificación colaborativa Previsión colaborativa Respuesta Rápida (QR) Planeación, Pronósticos y Reabastecimiento Colaborativo (CPRF) Respuesta sincronizada al Cliente (SCR) Reabastecimiento Rápido Gestión del conocimiento Medición del rendimiento Gestión de la incertidumbre 	<ul style="list-style-type: none"> Marcas compartidas Equipos inter funcionales y actividades de integración planificación conjunta* Sistemas de control, técnicas de modelamiento y simulación y procesos de control y planificación conjunta* Estandarización de prácticas administrativas*
Producción	<ul style="list-style-type: none"> Plan de producción colaborativo y desarrollo de nuevos productos basados en estrategias como ECR y CPRF 	<ul style="list-style-type: none"> Producción Conjunta Especialización Subcontratación Acuerdos de estandarización
Colabora-ción en información	<ul style="list-style-type: none"> Sistemas y tecnologías de la información compartidos* 	<ul style="list-style-type: none"> Acuerdos de licenciamiento Intercambio de información Centros de conocimiento integración de métodos, equipos, tecnologías y sistemas para la el manejo de las TIC* Provisión de plataformas y datos en línea Intercambio electrónico y en línea de datos Tecnologías de identificación automática Estandarización de tecnologías TIC. Uso compartido de TIC sobre las condiciones de operación y del sistema de distribución Uso compartido de información de los clientes* Uso compartido de información de planificación en conjunto*

Forma de colaboración	Colaboración vertical	Colaboración horizontal
Otros	<ul style="list-style-type: none"> Investigación y desarrollo 	<ul style="list-style-type: none"> Acuerdos de investigación y desarrollo Presentación a licitaciones* Desarrollo de nuevos servicios* Desarrollo de tecnologías de soporte y conectividad*

* Directamente utilizados en sistemas de logística de ciudad.

Fuente: Elaboración propia.

A nivel táctico se determinan las políticas de inventario en clientes y proveedores y los demás elementos requeridos para asegurar el correcto proceso de distribución. Se debe realizar la planificación coordinada de las operaciones conjuntas que deben realizarse en el proceso colaborativo.

Con fines administrativos, se debe proponer un sistema de monitoreo del proceso de distribución mediante indicadores de gestión. A partir de este sistema de monitoreo se puede retroalimentar los procesos de transporte y manejo de inventario, con el cual se puede mejorar la distribución de mercancías al interior de la ciudad. Para la propuesta del sistema de monitoreo se propone un sistema de indicadores, formulados a partir de lo encontrado en la revisión bibliográfica y de las necesidades de evaluación del modelo. Este sistema de indicadores es presentado más adelante en el apartado dedicado para la formulación del modelo.

El modelo de indicadores debe hacer parte de un sistema de información que permita centralizar la información del proceso de colaboración, en el cual se gestione la información de ingreso al modelo, la información producida y requerida en la colaboración y la correspondiente para el monitoreo del desempeño. Este sistema de información es requerido debido a que el manejo de información es uno de los elementos clave en el éxito de los procesos colaborativos y es necesario que esta se administre con las características adecuadas de veracidad, confiabilidad, disponibilidad y transparencia.

4.1.3 Elementos desde el punto de vista operativo

Desde el punto de vista operativo se debe realiza la programación de los envíos y el ruteo de la mercancía para cubrir las demandas y las necesidades de inventario en los clientes. Con el objetivo de optimizar estos elementos se debe proponer un modelo de optimización

matemático. Tras evaluar diferentes posibilidades que permiten modelar un sistema de distribución y en el cual se puedan incluir inventarios colaborativos, una opción acertada corresponde a formular el problema utilizando el modelo de problema de ruteo de inventario.

En la coordinación del inventario con las actividades de transporte en cadenas de suministro, el problema del ruteo de inventario (Inventory Routing Problem – IRP) es uno de los principales modelos utilizados para la optimización de redes de distribución (Derroiche *et al.*, 2008), el cual ha sido estudiado por más de 30 años (Coelho *et al.*, 2012) y será el fundamento del modelo de optimización propuesto, toda vez que permite minimizar de manera simultánea los costos de inventario y de transporte. El modelo IRP es una visión adecuada para la formulación de problemas en los que los diseñadores de la red de distribución puedan contar con la posibilidad de coordinar de manera conjunta los inventarios de los clientes y proveedores, ya que este modelo basa su formulación en el modelo de inventarios manejados por el vendedor - VMI y soporta la decisión de ruteo en los enfoques del agente viajero (TSP) y en el ruteo de vehículos (VRP).

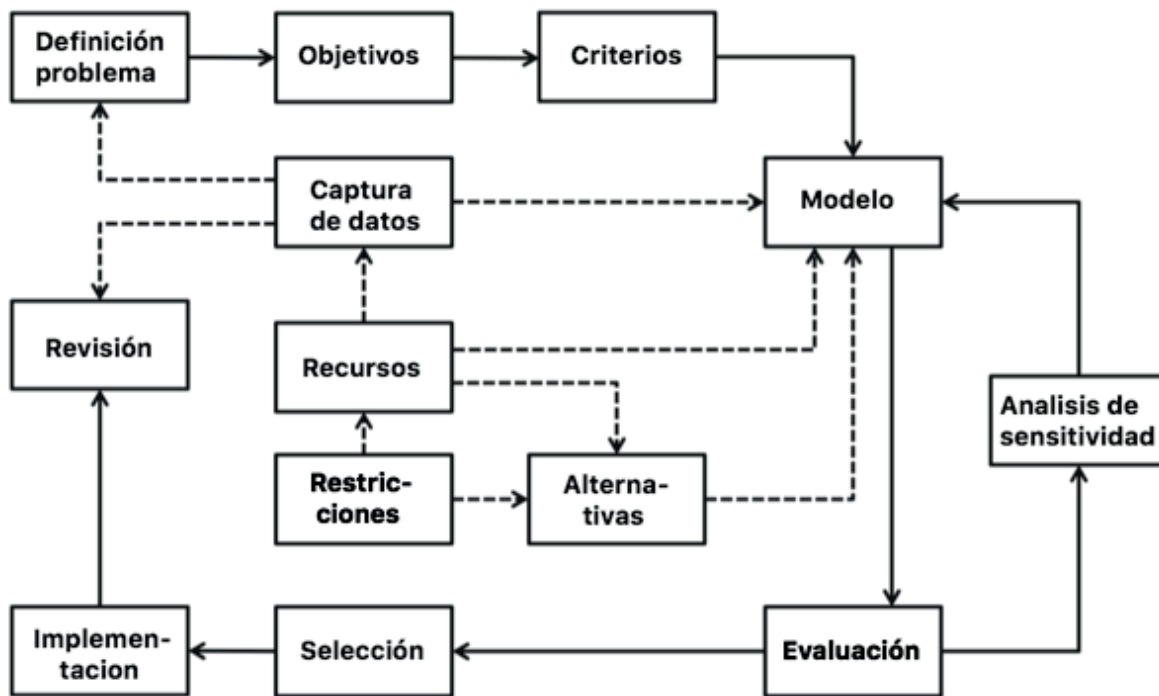
Desde el punto de vista operativo se debe formular el sistema de distribución definiendo claramente la asignación de clientes a proveedores, las rutas, los niveles de inventario en las instalaciones y la programación de los envíos, lo cual compone el plan operativo de distribución. A partir de la estructuración del plan operativo de distribución, se requiere realizar una evaluación del sistema, considerando los costos y demás objetivos del proceso de distribución, establecidos en el nivel táctico.

4.2 Modelo multicapa para la optimización de la distribución urbana de mercancías basado en inventarios colaborativos de m proveedores y n clientes

Taniguchi *et al.* (2008) y Ehmke (2012) propone una estructura para el modelamiento y análisis de problemas de logística de ciudad, que contempla elementos para la formulación, así como para su evaluación, tal y como se muestra en la figura 15. El objetivo del modelo es minimizar de manera simultánea el número de viajes, los costos de transporte, el inventario del sistema y maximizar el nivel de servicio en la distribución urbana de mercancías mediante inventarios colaborativos de m proveedores con n clientes. Los criterios tienen que ver con

parámetros internos de la operación del modelo, que corresponden a los actores involucrados, el mecanismo y tipo de colaboración, los vehículos usados, los factores de carga, velocidades promedio y demás elementos requeridos.

Figura 15. Estructura de modelización para procesos de logística de ciudad.



Fuente: Ehmke (2012).

El modelo representa el sistema de distribución urbana de mercancías, que como se mencionó anteriormente requiere considerar elementos de los tres niveles de decisión: estratégico, táctico y operativo. La captura de los datos, los recursos disponibles y las restricciones se obtienen del conocimiento del proceso de distribución urbana, que requiere considerar elementos clave obtenidos en la revisión bibliográfica y en la caracterización del proceso de distribución objeto de estudio, lo cual se presenta en anexo A, a partir de los datos del Plan de Abastecimiento y Distribución para la ciudad de Medellín (PADAM, 2011). La evaluación y revisión del modelo se realizan en el capítulo 5 de esta tesis doctoral.

Las capas propuestas para el modelo de optimización de la distribución urbana de mercancías basado en inventarios colaborativos de m proveedores y n clientes son:

4.2.1 Capa 1. Nivel Estratégico

En esta capa se consideran las decisiones de carácter estratégico, en el cual los altos directivos deciden sobre el futuro de la organización y la manera de alcanzar las estrategias propuestas para el negocio. En esta capa las decisiones son:

- **Seleccionar los actores a interactuar.**

El modelo a formular es de carácter empresarial y no gubernamental, ya que busca la integración entre múltiples empresas, por lo cual se tienen en cuenta los siguientes actores:

- ◆ Transportadores.
- ◆ Receptores.
- ◆ Originadores.
- ◆ Prestadores de servicios.

- **Seleccionar el mecanismo de colaboración**

Para la distribución de mercancía en ciudades es posible utilizar los siguientes mecanismos, derivados del conjunto de mecanismos de colaboración mencionados anteriormente:

- ◆ Establecimiento de asociaciones de empresas.
- ◆ Coaliciones.
- ◆ Alianzas estratégicas - Join Ventures.
- ◆ Cadenas de suministro.
- ◆ Redes de colaboración.
- ◆ Empresas extendidas.

- **Seleccionar el tipo de colaboración**

En la distribución urbana de mercancías, tal y como se mencionó anteriormente, las opciones son:

- ◆ Colaboración Horizontal.
- ◆ Colaboración Vertical.
- ◆ Colaboración Lateral.

4.2.2 Capa 2. Nivel Táctico

En esta capa se deciden los elementos administrativos requeridos para soportar las decisiones estratégicas y asegurar el correcto funcionamiento del sistema de distribución. Las decisiones que deben tomarse con relación a la distribución de mercancías de forma colaborativa en ciudades son:

▪ **Seleccionar la forma (elementos) de colaboración**

Las posibilidades de colaboración en la distribución urbana de mercancías son:

- ◆ Colaboración en inventario.
- ◆ Colaboración en transporte.
- ◆ Colaboración en instalaciones.
- ◆ Colaboración en administración.

Para la definición de cualquiera de estos procesos de colaboración, es necesario considerar los aspectos legales que rigen el relacionamiento entre empresas, como lo es el Régimen de competencia (Congreso de Colombia, 2009; SIC) y la normatividad para el transporte de carga en Colombia (Universidad Nacional de Colombia, 2015).

El modelo formulado en esta tesis doctoral, que se basa en la colaboración del inventario, adopta el modelo VMI, el cual permite centralizar las decisiones de abastecimiento en los proveedores, con lo cual es posible desarrollar los planes de distribución basado en la asignación del inventario y de las rutas para el reabastecimiento del inventario a los clientes. Debido a que las rutas serán definidas por el modelo, se utilizan vehículos comunes para la distribución de mercancía a los clientes, lo cual corresponde al tipo de colaboración en transporte. La colaboración en administración también se realiza, ya que para la formulación de los planes de distribución, que en este caso es desarrollado por los proveedores, se requiere de un proceso administrativo que permita la planificación, organización, ejecución y posterior evaluación de los resultados obtenidos con los procesos de distribución de mercancías establecidos mediante el proceso de colaboración. El modelo propuesto no contempla la colaboración de instalaciones. En esta etapa no se considera la colaboración de información, ya que esta es un componente de soporte implícito en los procesos de distribución colaborativa de mercancías. El manejo de la información se contempla en la capa de seguimiento y monitoreo.

▪ **Seleccionar funciones objetivo**

En esta etapa se busca determinar los elementos a optimizar por el modelo. El primer elemento a determinar es el nivel de servicio, con la primicia de atender todos los clientes. Las posibles funciones a utilizar se derivan de:

- ◆ Tiempo total de rutas.
- ◆ Tiempo de llegada de los clientes.

- ◆ Cumplimiento ventanas de tiempo (totales).
- ◆ Cumplimiento ventanas de tiempo (penalización por tiempo antes y después de las ventanas de tiempo).

El segundo elemento son los componentes de optimización de la operación, de los cuales se tienen las siguientes opciones:

- ◆ Optimización del transporte (costos y número de vehículos).
- ◆ Optimización del Inventario (Costos y cantidades de inventario).
- ◆ Optimización conjunta del transporte e inventario.

El tercer elemento es la optimización del impacto del proceso de distribución a la sociedad, el cual en este trabajo es medido como el aporte a la reducción de la congestión, que puede derivarse de alguna de los siguientes objetivos:

- ◆ Optimizar el número de vehículos utilizados.
- ◆ Optimizar el número de viajes requeridos (medido como la suma de los trayectos de las rutas).

▪ Evaluación del desempeño del modelo

Con el objetivo de analizar el resultado producido por el modelo, con relación a los objetivos formulados, se requiere implementar un sistema de evaluación del sistema de distribución con las características determinadas por el modelo. Para ello se utiliza el sistema de indicadores de desempeño del modelo, propuestos en la capa de información y seguimiento del modelo.

4.2.3 Capa 3. Nivel operativo

En esta capa se busca establecer los planes de distribución de mercancías entre proveedores y clientes, de acuerdo a los elementos de colaboración determinados en las 2 capas anteriores. La distribución se realiza buscando optimizar las funciones objetivo determinadas, y para ello se requiere la información de entrada, las variables y demás elementos para la modelación. El principal elemento de esta capa es el modelo de optimización, a partir del cual se puede encontrar la estructura del sistema de distribución.

▪ Proceso de optimización de la distribución urbana de mercancías.

Tras evaluar las diferentes posibilidades que permiten modelar un sistema de distribución y en el cual se puedan incluir los inventarios colaborativos, la mejor opción corresponde

a formular el problema utilizando el modelo del problema de ruteo de inventario. Para modelar condiciones reales de distribución en ciudades, se debe considerar las siguientes características del modelo de optimización:

- ◆ Múltiples clientes.
- ◆ Múltiples proveedores.
- ◆ Ventanas de tiempo.
- ◆ Restricciones de capacidad e inventario mínimo en los clientes y proveedores (Políticas de inventario).
- ◆ Distancias no Euclidianas. Es decir, considerando las direcciones de las calles y las variaciones de los sentidos en las ciudades.

De esta forma la capa operativa requiere la formulación de un modelo matemático que contemple las características mencionadas, así como otros elementos definidos en las capas estratégica y táctica, como las funciones objetivo a optimizar. El modelo operativo se presenta en el numeral 4.3.

4.2.4 Capa 4. Información y Seguimiento del modelo.

Esta capa funciona como soporte de información del modelo y en ella se centraliza la información requerida para el modelo, la cual está compuesta por tres elementos: Información de parámetros, información del proceso de colaboración y evaluación del desempeño.

▪ Información de parámetros del modelo.

En este componente, se obtiene y almacena la información de las condiciones del sistema de distribución, de los clientes y demás elementos requeridos por el diseño. Entre los parámetros que son ingresados al modelo se tienen:

- ◆ Número de clientes y proveedores.
- ◆ Número de vehículos.
- ◆ Condiciones de circulación de los vehículos (Condiciones de la ciudad).
- ◆ Velocidad de los vehículos.
- ◆ Ubicación de las instalaciones.
- ◆ Costos unitarios de transporte.

▪ Información del proceso de colaboración

Los procesos de colaboración implican el intercambio de información restringida de las empresas, la cual está disponible únicamente si las partes deciden colaborar y compartirla. Esta información alimenta el modelo de optimización y debe ser manejada de forma individual para asegurar la integridad de la misma. Entre la información requerida por parte de las empresas se tiene:

- ◆ Demandas.
- ◆ Niveles de inventario.
- ◆ Costos de almacenamiento.
- ◆ Capacidades de las instalaciones.
- ◆ Cantidades asignadas a los clientes.

▪ Evaluación del desempeño

En la revisión de la bibliografía se encontró un gran número de indicadores que pueden ser utilizados para monitorear los procesos de distribución de mercancías en ciudades. A partir del análisis de las diferentes propuestas de indicadores formulados para los procesos de logística de ciudad y teniendo en cuenta que el modelo propuesto busca la interacción entre empresas y los impactos que los procesos de distribución tienen en las mismas y en la ciudad, en la tabla 8 se presentan los indicadores propuestos para el seguimiento y monitoreo del modelo.

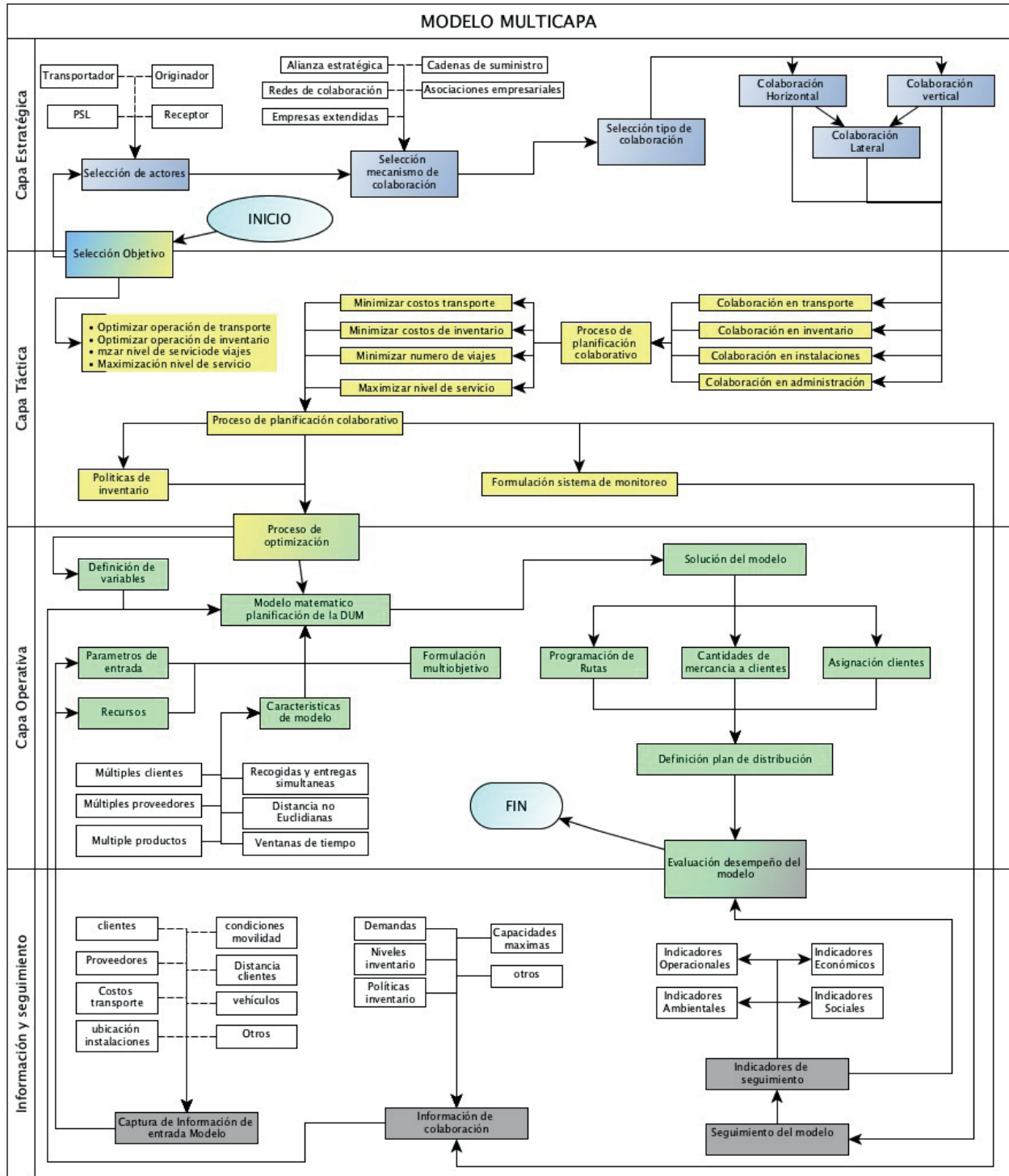
Tabla 8. Indicadores propuestos para el monitoreo del modelo.

Indicadores operacionales	Número de vehículos utilizados
	Porcentaje de utilización de los vehículos
	Cantidad promedio de inventario en un ciclo de abastecimiento
Indicadores económicos	Costo del transporte
	Costo de inventario
Indicadores ambientales	Emisiones totales de CO ₂
Indicador social	Número de viajes (trayectos)

Fuente: Elaboración propia.

La representación del modelo multicapa propuesto, en el cual se observa los diferentes niveles de decisión y las relación de los múltiples elementos de las capas, se presentan en la figura 16.

Figura 16. Esquema del modelo multicapa para la distribución urbana de mercancías, basado en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes.

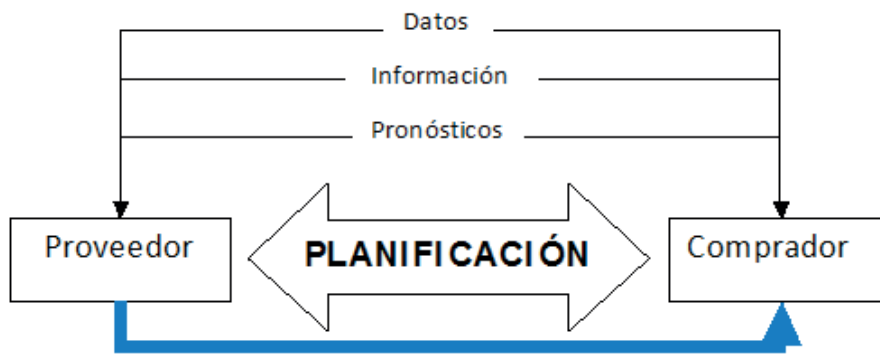


Fuente: Elaboración propia.

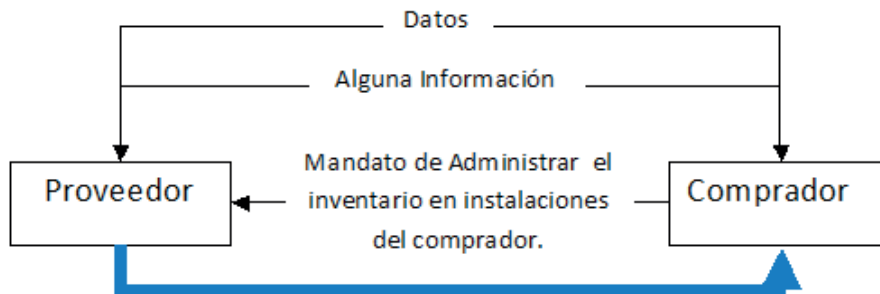
4.3 Modelo operativo para la optimización de la distribución urbana de mercancías basado en inventarios colaborativos de m proveedores y n clientes

En el proceso de reabastecimiento del inventario de forma colaborativo mediante el VMI se requiere previamente realizar un proceso de planificación entre las partes involucradas (Clientes y proveedores), en el cual se realiza la coordinación de las empresas con el fin de obtener la información necesaria para la asignación adecuada del inventario y las rutas de distribución (Arango *et al.*, 2011b). En el VMI los datos, información y pronósticos requeridos para desarrollar los planes de reabastecimiento son compartidos entre proveedores y clientes, los cuales pueden realizar dichos planes en forma conjunta o trasladar la responsabilidad exclusivamente al proveedor, de acuerdo a si se utiliza el modelo colaborativo o de transferencia de mandato, respectivamente, tal y como se muestra en la figura 17 (Arango *et al.*, 2011b).

Figura 17. Modelo colaborativo y de transferencia de mandato del VMI.



(a) Modelo colaborativo



(b) Modelo transferencia de mandato

Fuente: Arango *et al.* (2011b).

La coordinación entre los actores se realiza a nivel táctico (Arango *et al.*, 2011b). En el modelo colaborativo se comparte la información entre las partes y de forma conjunta se desarrollan los planes de distribución. En este modelo los clientes colaboran con los proveedores en la definición de los programas de demanda/consumo, a partir de los cuales se definen los planes de reabastecimiento, que son ejecutados y dirigidos por los proveedores (Arango *et al.*, 2011b). En el modelo de transferencia por mandato el comprador transfiere la responsabilidad de la planificación, operación y los costos del manejo del inventario al proveedor (vendedor), el cual se encarga de forma autónoma y a partir de la información de demanda/consumo proveniente de los clientes de asignar los planes de reabastecimiento (Arango *et al.*, 2011b).

En cualquiera de los dos casos se requiere un proceso de intercambio de la información entre clientes y proveedores, a partir del cual se definen las cantidades de inventario que deben enviarse a cada uno de los clientes y el diseño de las rutas de distribución, de forma que los costos totales del manejo de inventario y de transporte requeridos para abastecer los clientes, de acuerdo a los planes establecidos por el modelo VMI, sean lo menor posible.

Para el caso de redes de distribución con múltiples proveedores a partir de los cuales se abastecen múltiples clientes, es necesario asignar el conjunto de clientes que deben ser abastecidos por cada proveedor. Esta asignación se realiza con base en los costos de abastecer cada cliente desde los proveedores, seleccionándose para cada proveedor los correspondientes clientes que generen menores costos, tiempos o distancias para la distribución (Ramkumar *et al.*, 2012; Razavi y Nik, 2013; Noor y Shuib 2015). Este procedimiento de asignación de los clientes a cada uno de los proveedores se conoce como creación de Clústeres de clientes.

Tras evaluar diferentes posibilidades que permiten modelar matemáticamente el proceso operacional de un sistema de distribución y en el cual se puedan incluir los inventarios colaborativos, la mejor opción corresponde a formular el problema utilizando el modelo del problema de ruteo de inventario. El objetivo del problema de ruteo de inventario (IRP) es minimizar los costos de inventario y distribución, mediante la optimización simultánea de los niveles de inventario en las instalaciones de clientes y proveedores y de los costos de transporte de mercancías para el abastecimiento de los clientes (Razavi y Nik, 2013; Coelho *et al.*, 2012; Estrada, 2007). El modelo IRP se basa en la estrategia de inventarios gestionados por el vendedor (VMI) y tiene como finalidad combinar el problema de asignación del inventario

para reducir los costos de mantener mercancía, al tiempo que optimiza la utilización de los recursos de transporte (Archetti *et al.*, 2014; Azuma *et al.*, 2011; Coelho, y Laporte, 2013). El modelo IRP se encarga de asignar el inventario a cada uno de los clientes y a partir de dicha asignación se determinan las rutas para su abastecimiento (Coelho y Laporte, 2013; Zeng y Zhao, 2010). El IRP, mediante su fundamentación en el VMI, permite realizar una utilización más eficiente de los recursos de transporte, lo cual conlleva a incrementar los niveles de eficiencias y a reducir los costos, tanto en transporte como en inventario, lo cual impacta en los costos globales de las compañías (Moin *et al.*, 2011; Arango *et al.*, 2011b; Arango *et al.*, 2013).

La versión básica del IRP se encarga de optimizar los costos de inventario y transporte para una red compuesta por un proveedor (depósito) y un conjunto de clientes distribuidos geográficamente en un horizonte de tiempo de operación determinado (Zhang *et al.*, 2014b), para lo cual se utiliza un único vehículo con capacidad fija (Campbell y Savelsbergh, 2004; Archetti *et al.*, 2007). A partir de este problema base, se obtienen un gran número de extensiones del modelo, como lo son la inclusión de múltiples vehículos (Archetti *et al.*, 2014), diferentes tipos de demanda, tratamiento determinístico o estocástico, problema dinámico o estático, posibilidades de entrega de la mercancía, entre otros (Andersson *et al.*, 2010; Noor y A. Shuib, 2015).

La formulación del modelo operativo se presenta a continuación, basándose en los trabajos de Van Anholt *et al.* (2013) y Archetti *et al.* (2007). Esta formulación presenta los objetivos a optimizar, seguido de sus respectivas restricciones. La diferencia del modelo propuesto con respecto al de los actores mencionados, radica en que este incluye elementos que le permiten asemejarse más a la realidad del proceso de distribución en ciudades, así como los siguientes elementos:

- Incluye condiciones de la ciudad como los sentidos de las vías.
- Incluye la distribución de múltiples productos.
- Amplia el IRP con extensiones a múltiples depósitos para las aplicaciones en distribución urbana de mercancías.
- Incluye otras funciones objetivo importantes para el mejoramiento de los procesos de distribución en ciudades, como el nivel de servicio y la reducción del número de viajes para mitigar la generación de congestiones por parte de los vehículos de carga.

El modelo operativo para la optimización de la distribución urbana de mercancías se define como un gráfico Hamiltoniano $G = (V, A)$ donde V es el conjunto de nodos $V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ y A es el conjunto de arcos $A = \{(i, j) : j, i \in V, i \neq j\}$ v es el conjunto de vértices que representa los depósitos (proveedores) y v' es el subconjunto de vértices que representa los clientes $v, v' \in V$. τ es el periodo, con τ el conjunto de periodos ($\tau = \{1, 2, 3, \dots, p\}$) y p es el Horizonte de tiempo de la planificación. En el modelo existe un número limitado de vehículos $k \in K$ ($k = \{1, 2, 3, \dots, n\}$) múltiples vehículos K , con capacidad heterogénea. Uno de los grandes aportes de este modelo propuesto es la inclusión de múltiples proveedores y múltiples clientes para la optimización de la distribución urbana de mercancías de manera colaborativa, lo cual se realiza mediante el inventario manejado por el vendedor.

El modelo operativo para la distribución urbana de mercancías propuesto considera tres funciones objetivos que buscan la optimización simultánea de los costos de inventario y transporte, el nivel de servicio y el número de viajes requeridos, lo cual es otro de los grandes aportes de esta tesis doctoral, ya que se formula un modelo que no solo tiene en cuenta aspectos económicos y de mejora del desempeño de las empresas, como la maximización de los costos y el nivel de servicio, sino que además considera aspectos que impactan positivamente el funcionamiento de las ciudades, como lo es la minimización del número de viajes requeridos para el abastecimiento de las empresas, que permite disminuir la congestión de vehículos en la ciudad.

El modelo operativo que permite formular los planes de distribución mediante el inventario colaborativo de m proveedores con n clientes, de forma que se logran optimizar simultáneamente los costos de transporte e inventario, el nivel de servicio y el número de trayectos requeridos es el principal aporte de la presente tesis de doctorado, ya que este permite generar procesos de distribución en el cual no solo se consideren las condiciones económicas de las empresas, sino que también se incluyen elementos que favorecen el desempeño de la cadena de suministros como la mejora de los niveles de servicio y considera la disminución de efectos negativos de las redes de distribución, mediante la minimización del número de viajes requeridos. En la literatura científica especializada y demás fuentes de información analizadas en la revisión bibliográfica exhaustiva realizada en esta tesis de doctorado, no se encuentra un modelo de colaboración en inventario que optimice estas tres funciones objetivo y que incluya la interacción de múltiples clientes con múltiples proveedores.

4.3.1. Formulación multiobjetivo

La necesidad de contemplar varios objetivos de manera simultánea y el hecho de ser algunos contradictorios entre sí, requiere trabajar el modelo de forma multiobjetivo. La optimización multiobjetivo se refiere al proceso de optimizar de forma sistemática y simultánea un conjunto de objetivos. Este tipo de optimización es utilizado cuando existen múltiples objetivos o metas a alcanzar, pero que las mismas no se pueden combinar o compartir directamente (Yu & Gen, 2010). En la mayoría de los casos, estas metas son conflictivas, lo que significa que encontrar la mejor opción para una, conlleva a sacrificar la calidad de alguna de las otras.

El modelo operativo formulado para la optimización de la distribución urbana de mercancías debe contemplar tres funciones objetivo que son:

- Minimización de los costos de inventario y de los costos de Transporte.
- Minimización del número de veces que los clientes no son atendidos en las ventanas de tiempo correspondientes (Incumplimiento de las ventanas de tiempo)
- Minimizar el número de viajes (trayectos requeridos)

Lo anterior hace necesario la aplicación de técnicas de optimización multiobjetivo, las cuales implican un tratamiento matemático diferente a los procesos de optimización convencionales, debido a: (Galeano y Montoya, 2008):

- Existen distintos objetivos que pueden ser conflictivos entre sí.
- Los distintos objetivos pueden tener unidades de medida diferentes o pueden ser inconmensurables.
- En la optimización multiobjetivo no existe un óptimo global, sino que existe un conjunto de soluciones óptimas alternativas, llamadas soluciones compromiso, las cuales que representan el grado en que objetivo es resuelto con respecto de los demás, para una solución óptima dada. Estas soluciones se concen además como soluciones Pareto.
- Para resolver un problema de este tipo, se debe escoger la mejor solución dentro del conjunto de óptimos, lo que requiere que exista un tomador de decisiones, el cual a través de sus preferencias hacia el problema debe elegir la solución a utilizar.
- “Al existir múltiples soluciones óptimas, se hace necesario una noción diferente para el concepto de “óptimo” utilizada en problemas de un único objetivo. Para este tipo de

problemas la noción más aceptada es la de “Óptimo de Pareto” que se sustenta en el concepto de dominancia de las soluciones” (Galeano y Montoya, 2008).

De esta forma, la definición del objetivo del modelo, las variables y la formulación multiobjetivo del modelo operativo para la optimización de la distribución urbana de mercancías basado en inventarios colaborativos de m proveedores y n clientes, es presentado en los siguientes apartados.

Objetivo del modelo

El modelo presentado tiene como objetivo la optimización del proceso de distribución de mercancías mediante la colaboración del inventario entre m proveedores y n clientes, buscando de manera simultánea la minimización de los costos de inventario y transporte, maximización del nivel de servicio requeridos en dicho proceso de distribución.

4.3.2. Conjuntos, variables y parámetros

La simbología empleada para los conjuntos referenciales, las variables, parámetros e índices es:

- **Conjuntos referenciales**

$V = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ y A es el conjunto de arcos $A = \{(i, j) : j, i \in v, i \neq j\}$.

v es el conjunto de los clientes. $v \subseteq V$, $v = \{1, 2, 3, \dots, n_c\}$, n_c el número de clientes.

v' es el conjunto de los proveedores. $v' \subseteq V$, $v' = \{1, 2, 3, \dots, n_s\}$, n_s el número de proveedores.

τ es el conjunto de periodos, $\tau = \{1, 2, 3, \dots, p\}$.

S es cualquier subconjunto de V ($S \subseteq V$).

k es el conjunto de vehículos $k \subseteq K$, $k = \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

- **Índices**

τ es el periodo y representa a τ el conjunto de periodos ($\tau = \{1, 2, 3, \dots, p\}$)

i, j es representan a v y v' , con $v, v' \subseteq V$. $v = \{1, 2, 3, \dots, n_c\}$, $v' = \{1, 2, 3, \dots, n_s\}$

k representa cada vehículo, $k = \{1, 2, 3, \dots, n\}$.

- **Variables de decisión**

Las variables del modelo son de dos naturalezas, aquellas independientes y las dependientes o receptoras de las variables independientes, tal y como se presenta a continuación.

Variables independientes

- x_{ij}^{kt} es una variable binaria con valor de 1 si el arco i-j es usado en la ruta del vehículo k en el tiempo t.
- J_{ik}^t es la cantidad de mercancía en el vehículo k en el periodo t que sale del proveedor i.
- H_{ik}^t es la cantidad de mercancía en el vehículo k en el periodo t que entra al proveedor i.
- Y_i^{kt} es una variable binaria que toma el valor 1 si el nodo i es visitado por el vehículo k en el periodo t.
- J_{ik}^t es la cantidad de mercancía cargada en el vehículo k después de servir el nodo i en el periodo t.
- t_i^{kt} es la variable de tiempo en que el vehículo k llega al cliente i en el periodo t.

Variables dependientes

- l_i^t es el inventario en i en el tiempo t.
- l_i^t es el inventario en proveedor i en el tiempo t.
- q_i^{kt} es la cantidad de mercancía enviada al cliente i usando el vehículo k, en el periodo t.
- p_i^{kt} es la cantidad de mercancía que sale (en este caso que es recogida) del cliente i usando el vehículo k, en el periodo t.
- t_j^{kt} es la variable de tiempo en que el vehículo k llega al cliente j en el periodo t.

• Parametros

- p es el Horizonte de tiempo de la planificación
- h_i es el costo de inventario en i.
- h'_i es el costo de inventario en el proveedor i.
- c_{ij} costo de transporte de i a j.
- R_{ij}^{kt} es el tiempo de viaje de i a j por el vehículo k en el periodo t.
- d_i^t es la demanda en el nodo i en el periodo t.
- C_i es la capacidad de mantener (cantidad máxima) mercancía por parte del cliente i.
- Q_k es la capacidad máxima del vehículo k.
- a_i es el límite inferior de tiempo en que puede ser servido el cliente i.
- b_i es el límite superior de tiempo en que puede ser servido el cliente i.
- Θ_i es el tiempo de servicio en el cliente i. Es decir, el tiempo que se demora en ser atendido el cliente i.
- K numero de vehiculos
- Γ es el tiempo máximo disponible diariamente para realizar las operaciones de transporte (fin del turno de trabajo).

- **Condiciones Iniciales**

$I_i^{t=0}$ Inventario inicial disponible para el suministro en el proveedor i (t=0).

I_i^0 Inventario inicial disponible en el cliente i (t=0)

4.3.3. Funciones objetivo

El modelo se compone por tres funciones objetivo a optimizar de manera simultánea, las cuales son:

- **Primera Función Objetivo: Minimización de los costos de inventario y de los costos de Transporte.**

De manera simultánea se pueden optimizar los costos de transporte e inventario, de la forma como generalmente se propone en el modelo IRP. Para la formulación de múltiples depósitos, recogidas y entregas simultáneas y ventanas de tiempo, la función objetivo es:

$$\text{minimizar } \sum_{i \in V'} \sum_{t \in T} h_i I_i^t + \sum_{i \in V'} \sum_{t \in T} h'_i I_i^t + \sum_{t \in T} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ij}^{kt} \quad (1)$$

- **Segunda Función Objetivo: Maximizar el nivel de servicio.**

En esta función objetivo el nivel de servicio se medirá como el cumplimiento de las ventanas de tiempo, toda vez que el modelo asegura que todos los clientes sean atendidos en el periodo que les corresponde y que las rutas se realizan antes de terminar la jornada de servicio establecida Γ para atender los clientes. La función objetivo se convierte en la minimización del número de veces que los clientes no son atendidos en las ventanas de tiempo correspondientes, tal y como se expresa en la ecuación (3).

$$\text{minimizar } \sum_{k \in K} \sum_t \varphi_i(t_i^{kt})$$

$$\varphi_i(t_i^{kt}) = \begin{cases} 1 & \text{si } t_i^{kt} < a_i \\ 0 & \text{si } a_i < t_i^{kt} < b_i \\ 1 & \text{si } b_i > t_i^{kt} \end{cases}$$

Donde a_i y b_i son el límite inferior y superior de tiempo en el cual debe ser atendido el cliente i.

- **Tercera función objetivo: Minimizar el número de viajes.**

Mediante el conteo del número de arcos habilitados en el modelo se obtiene el número de viajes realizados entre todos los nodos del sistema de distribución. A través de la minimización de esta

variable es posible reducir el número de viajes utilizados en la distribución, como se expresa en la siguiente función objetivo:

$$\text{minimizar } \sum_{t \in \tau} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ij}^{kt} \quad (3)$$

4.3.4. Formulación y Restricciones

La formulación del modelo multiobjetivo se escribe de la siguiente manera:

$$\sum_{i \in V'} \sum_{t \in \tau} h_i I_i^t + \sum_{i \in V'} \sum_{t \in \tau} h'_i I_i^t + \sum_{t \in \tau} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ij}^{kt}, \sum_{k \in K} \sum_t \varphi_i(t_i^{kt}), \sum_{t \in \tau} \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} x_{ij}^{kt} \quad (4)$$

Sujeto a las siguientes restricciones, las cuales son de diferente naturaleza y se presentan de acuerdo al grupo en que pertenecen:

- Restricción de inventario en el proveedor:

$$I_i^t = I_i^{t-1} + r_i^{t-1} + \sum_{k \in K} J_{ik}^t + \sum_{k \in K} H_{ik}^t \quad (5)$$

$$J_{ik}^t = U_i^{kt} Y_i^{kt} \quad (6)$$

$$H_{ik}^t = \sum_{j \in V} \sum_{i \in V'} U_i^{kt} X_{i0}^{kt} \quad (7)$$

$$I_i^t \geq \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} x_{ij}^{kt-1} q_j^{kt-1} \quad (8)$$

- Restricción de inventario en los clientes:

$$I_i^t = I_i^{t-1} + \sum_{k \in K} q_i^{kt} - \sum_{k \in K} p_i^{kt} - d_i^t \quad (9)$$

$$I_i^t \geq 0 \quad (10)$$

$$I_i^t \leq C_i \quad (11)$$

- Restricciones de política de abastecimiento:

$$q_i^{kt} \leq w_i^{kt} (C_i - I_i^t) \quad (12)$$

$$p_i^{kt} \leq z_i^{kt} I_i^t \quad (13)$$

$$U_j^{kt} \geq (U_i^{kt} + p_j^{kt} - q_j^{kt})x_{ij}^{kt} \quad (14)$$

- Restricciones de transporte para el abastecimiento.

$$w_i^{kt} \leq y_i^{kt} \quad (15)$$

$$z_i^{kt} \leq y_i^{kt} \quad (16)$$

$$w_i^{kt} + z_i^{kt} \leq 1 \quad (17)$$

- Restricciones de capacidad del vehículo:

$$\sum_{i \in v} q_i^{kt} \leq Q_k \quad (18)$$

- Restricciones de ruteo:

$$\sum_{i \in v, i < j} X_{ij}^{kt} + \sum_{i \in v, j < i} X_{ji}^{kt} = 2y_i^{kt} \quad (18)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} X_{ij}^{kt} \leq \sum_{i \in S} y_i^{kt} - y_m^{kt} \quad \forall \text{ subconjunto } S \subseteq V \quad (20)$$

- Restricciones de ventanas de tiempo.

$$a_i \leq t_i^{kt} \leq b_i \quad (21)$$

$$X_{ij}^{kt} (t_i^{kt} + R_{ij}^{kt} + \theta_i - t_j^{kt}) \leq 0 \quad (22)$$

$$t_i^{kt} \leq \Gamma \quad (23)$$

- Restricciones de no-negatividad:

Todas las variables presentadas en el modelo, son mayores o iguales a cero, por lo cual $q_i^{kt} \geq 0$; $Q_k \geq 0$; $I_i^t \geq 0$; $d_i^t \geq 0$; $C_i \geq 0$.

La ecuación (5) representa la función de conservación en el cual el inventario en el proveedor es igual al inventario en el periodo anterior, más la cantidad producida, más la cantidad entrante, menos la enviada a los clientes. La ecuación (6) representa toda la mercancía que sale desde el proveedor y la ecuación (7) representa toda la mercancía que entra. La ecuación (8) representa que la cantidad en el proveedor debe ser mayor que la suma de las cantidades requeridas por los clientes.

Las ecuaciones (9), (10) y (11) representan la conservación del inventario, la imposibilidad de haber faltantes de mercancía y la no violación de la capacidad máxima de inventario en los clientes

respectivamente. La ecuación (12) representa que si hay una entrega al cliente i por el vehículo k , en el periodo t (w_i^{kt}), la cantidad entregada será menor o igual a lo que falta para alcanzar la cantidad máxima de almacenamiento del cliente i . La ecuación (13) representa que si hay una recogida en el cliente i por el vehículo k , en el periodo t (z_i^{kt}), la cantidad recogida debe ser menor que la cantidad de inventario actual (en el periodo t) existente en el cliente i .

Por su parte, la ecuación (14) representa que en caso en que el arco i - j se habilite, la cantidad de mercancía en el vehículo k después de visitar el cliente j , es igual o mayor que la cantidad en el vehículo k después de visitar a i , más la cantidad recogida en j y menos la cantidad entregada en j . Las ecuaciones (15) y (16) representan que solo puede haber una recogida o entrega de mercancía en el punto i , si este punto es visitado por el vehículo k en el periodo t . La ecuación (17) significa que debido a que solo se tiene un único producto, solo puede haber una operación de entrega o recogida por el vehículo k en el periodo t . La ecuación (18) asegura que la carga transportada no sobrepase la capacidad de los vehículos.

Las restricciones de ruteo aseguran que se genere una ruta adecuada en el periodo t , de forma que se visiten todos los clientes que deben ser servidos en dicho periodo. En este sentido, la ecuación (19) representa que si el nodo (cliente) i es visitado, debe haber un arco para la entrada y un arco para la salida de dicho nodo. La suma de estos arcos debe ser igual a $2y_i^{kt}$, con lo cual se asegura que si y solo si existen dichos arcos. La ecuación (20) evita la generación de sub-rutas del vehículo k en el tiempo t . Esto quiere decir que para cada subconjunto S , la cantidad de arcos debe ser menor o igual que el número de nodos menos 1, con lo cual se asegura que solo se cree el tour de la solución.

Las ecuaciones (21) asegura que los clientes lleguen en las ventanas de tiempo establecidas, las cuales son flexibles pero penalizadas por la función objetivo número 2. La ecuación (21) asegura que si el vehículo k , en el periodo t viaja de i a j , entonces el tiempo para llegar a j es menor o igual que el tiempo para llegar a i más el tiempo de servicio en i más el tiempo de viaje de i a j . La ecuación (23) asegura que el tiempo máximo de una ruta no sobrepase el tiempo máximo de operación (turno de trabajo Γ).

La asignación de los clientes a los proveedores se realiza mediante un procedimiento de agrupamiento (formación de Clúster), el cual se realiza utilizando el criterio de menor distancia a los proveedores, es decir, los proveedores atienden los clientes que se encuentran más cercanos a estos. Para determinar la distancia entre los clientes se utilizó la fórmula de distancia euclidiana entre dos puntos $p_1(x_1, y_1)$ y $p_2(x_2, y_2)$ correspondiente a $\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}$. En este procedimiento de agrupamiento se puede utilizar también criterios como menor tiempo y menores costos de distribución, los cuales se pueden expresar en función de las distancias. La formación de clúster utilizando el criterio de proximidad calculado con la distancia euclidiana es el método más utilizado en el tratamiento de problemas de

ruteo de vehículos (VRP) y de ruteo de inventario (IRP) con múltiples proveedores (Ramkumar et al., 2012; Noor y Shuib, 2015).

Este capítulo presento el modelo multicapa para la optimización de la distribución urbana de mercancías, basado en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes, el cual contempla elementos estratégicos, tácticos y operativos. En la capa operativa se requiere un modelo de optimización matemática multiobjetivo, el cual se encarga de la asignación del inventario y las rutas de transporte de manera colaborativa, a partir del cual se definen los planes de distribución. Este modelo incluye elementos que de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada no han sido publicados previamente, como la configuración del modelo que incluye la colaboración en el inventario de múltiples proveedores y múltiples clientes para la optimización de procesos de distribución urbana de mercancías y la inclusión de las tres funciones objetivo, que no solo pretenden mejorar el desempeño de las empresas sino aportar a la reducción de impactos negativos en la ciudad, en este caso a la disminución de la congestión vehicular.

Para la solución del modelo de optimización multiobjetivo para la distribución urbana de mercancías, basado en el inventario colaborativo de m proveedores y n clientes presentado en este capítulo, debe ser resuelto utilizando técnicas de solución de problemas multiobjetivo. En el capítulo 3 se presentó el modelo genético especialmente formulado para resolver este modelo de optimización, el cual se basa en el algoritmo genético multiobjetivo NSGAI (NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II). En el capítulo siguiente (Capítulo cinco) se presenta la aplicación del modelo multicapa propuesto para la optimización de la distribución de alimentos en la zona centro de la ciudad de Medellín, en el cual se valida el modelo propuesto, toda vez que se obtienen resultados que permiten mejorar dicho proceso de distribución urbana de mercancías.

5 Aplicación del modelo genético multiobjetivo de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes en la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín

En este capítulo se muestran los resultados de la aplicación del modelo multiobjetivo para la distribución colaborativa de mercancías en la zona centro de la ciudad de Medellín, para lo cual inicialmente se presenta la propuesta de integración de actores requeridos para llevar a cabo el proceso de distribución colaborativa, siguiendo con la estructura del modelo multicapa presentado en el capítulo 4. Posteriormente se presentan los resultados de la aplicación del modelo genético en la distribución de alimentos en la ciudad.

5.1 Propuesta de integración para la distribución colaborativa de alimentos en la ciudad de Medellín

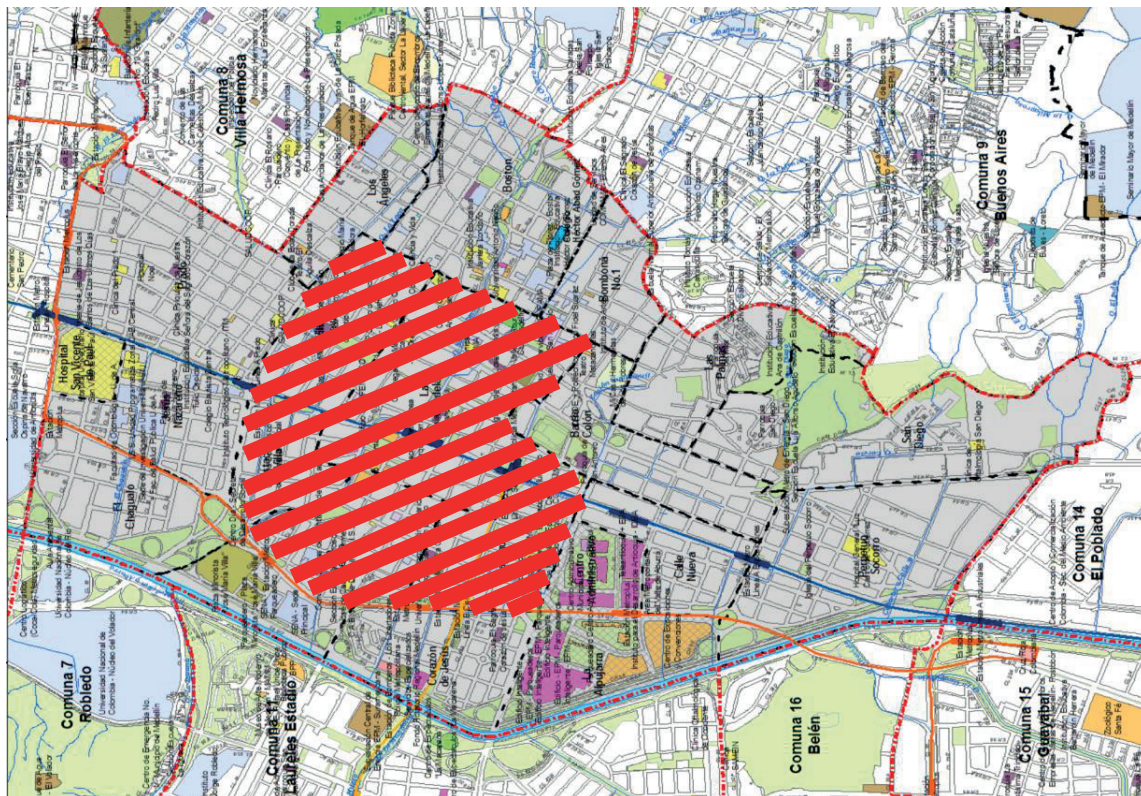
Para la aplicación del modelo genético multiobjetivo de inventario colaborativo de m proveedores con n clientes en la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín, se requiere considerar los elementos incluidos en el modelo multicapa propuesto en el capítulo 4, de forma que mediante la colaboración entre los actores se logre disminuir los costos de transporte e inventario, aumentar el nivel de servicio y disminuir el número de viajes requeridos para el proceso de distribución.

Esta propuesta busca beneficiar la economía de las empresas al reducir los costos y mejorar el nivel de servicio, así como la ciudad, ya que también pretende encontrar una reducción del número de viajes requeridos que aporta a la disminución de la congestión en la ciudad.

Esta propuesta se realiza para el sistema de distribución de alimentos en la zona central de la ciudad de Medellín, específicamente para la comuna número 10 (La candelaria), que corresponde a la zona de la ciudad con mayores problemas de congestión y que tiene un alto flujo comercial, la cual se señala entre líneas rojas de la figura 18, que muestra un mapa de la zona centro de la ciudad de Medellín.

La identificación de la zona de trabajo, los actores, características del proceso de distribución y demás elementos, se obtienen del Plan de Abastecimiento y Distribución de Alimentos para la ciudad de Medellín (PADAM, 2011) y los elementos claves sobre dicho plan analizados en el Anexo A, en el cual se realiza una caracterización del sistema de distribución de alimentos en la ciudad de Medellín.

Figura 18. Zona de estudio para la propuesta de distribución colaborativa.

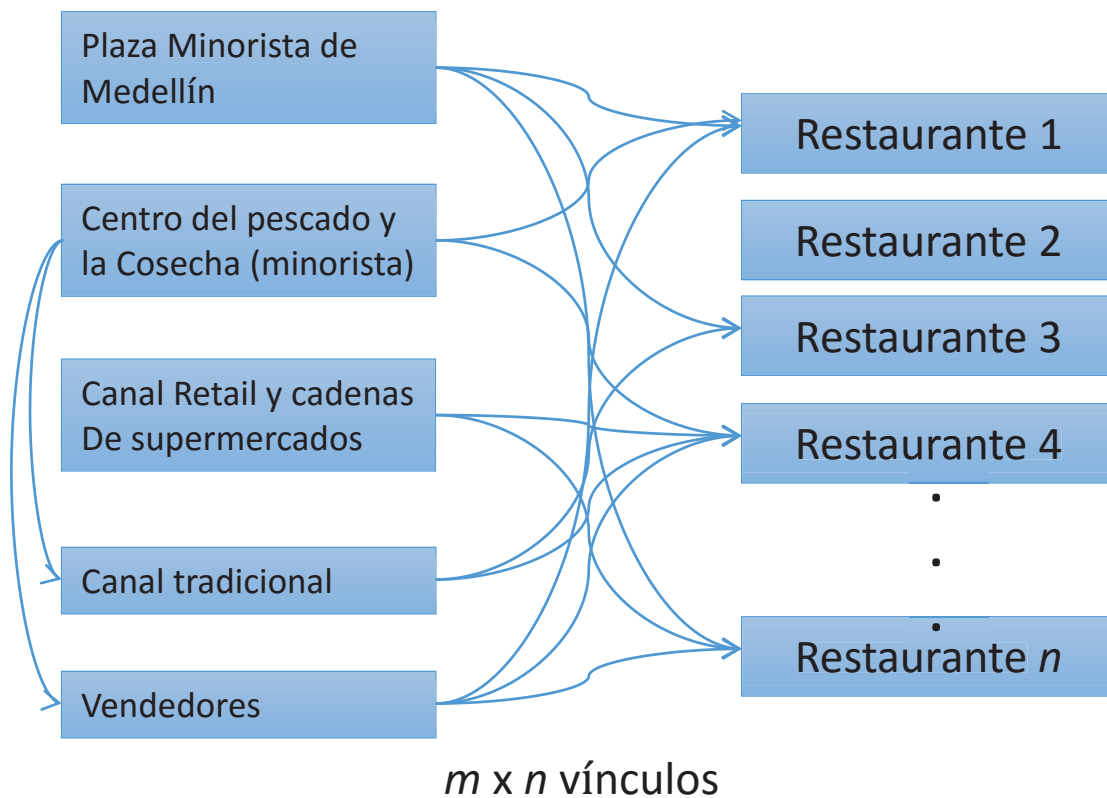


Fuente: Elaboración propia a partir del mapa de Díaz (2011).

El caso particular de la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín estudiado en esta tesis doctoral, corresponde a la distribución de alimentos en la zona central de la ciudad de Medellín, en la cual interactúan los dos últimos eslabones de la cadena de suministros de alimentos en la ciudad (Minoristas y hogares-restaurantes), los cuales realizan sus operaciones en lo que se conoce como distribución de última milla (Brown y Guiffrida, 2014). En la figura 19 se muestran las relaciones entre estos eslabones.

Tal y como se muestra de la figura 19, el sistema de distribución de logística de ciudad de estudio está conformado por múltiples proveedores y múltiples clientes. Para efectos del modelo de distribución de mercancías de forma colaborativa entre m proveedores y n clientes, se tomaran múltiples restaurantes como los actores del último eslabón de suministro, debido a su condición de empresa, lo cual permite establecer relaciones de negocio entre ellos y sus proveedores.

Figura 19. Relaciones entre los actores del último eslabón de la distribución de alimentos.



Fuente: Elaboración propia.

En el proceso de análisis del sistema de distribución de alimentos en la ciudad de Medellín (Anexo A), se encontró que los restaurantes en la mayoría de los casos abastecen sus inventarios de forma autónoma, es decir, el personal del restaurante por sus propios medios se dirige a las instalaciones de los proveedores, de donde toma los productos y los lleva hacia el restaurante. Solo en pocos casos, correspondientes al proceso cuando interviene un distribuidor, los productos son llevados directamente por éste último, lo cual no es la generalidad del proceso de abastecimiento, ya que la mayoría de las veces el abastecimiento se da desde la plaza Minorista de Medellín, el canal retailer y el canal tradicional (tiendas).

Este comportamiento demuestra una falta de organización del proceso de distribución, ya que realizar el abastecimiento de forma propia duplica la cantidad de los trayectos requeridos (al realizarse un viaje de ida y vuelta para cada cliente, sin la posibilidad de agrupar varios clientes en una misma ruta), lo cual aumenta los costos de distribución y afecta la congestión en las ciudades debido al número de viajes requeridos.

Para realizar una propuesta de integración de actores que mediante la colaboración puedan optimizar los costos de transporte e inventario, el nivel de servicio y el número de trayectos, se requiere de un actor que se encargue de la administración de la información del proceso colaborativo, lo cual mediante el modelo VMI, en el cual se soporta el modelo y el sistema de distribución propuestos, es responsabilidad de los proveedores. Además, la propuesta al centralizar las decisiones de abastecimiento debe contemplar el transporte de las mercancías desde los proveedores a los clientes, por lo cual los transportadores son parte de los actores involucrados en la propuesta de distribución colaborativa.

La propuesta de distribución contiene los actores identificados en el Anexo A e incluye las características de cada uno. El sistema de distribución propuesto está compuesto por 4 proveedores (plaza minorista, Distribuidores, supermercados y tiendas) y 21 clientes (restaurantes). Con el fin de eliminar los recorridos innecesarios, en la propuesta de distribución se suprimen las operaciones en que los clientes se autoabastecen, por lo cual la visita a supermercados, tiendas y la plaza minorista se modificada de la siguiente manera:

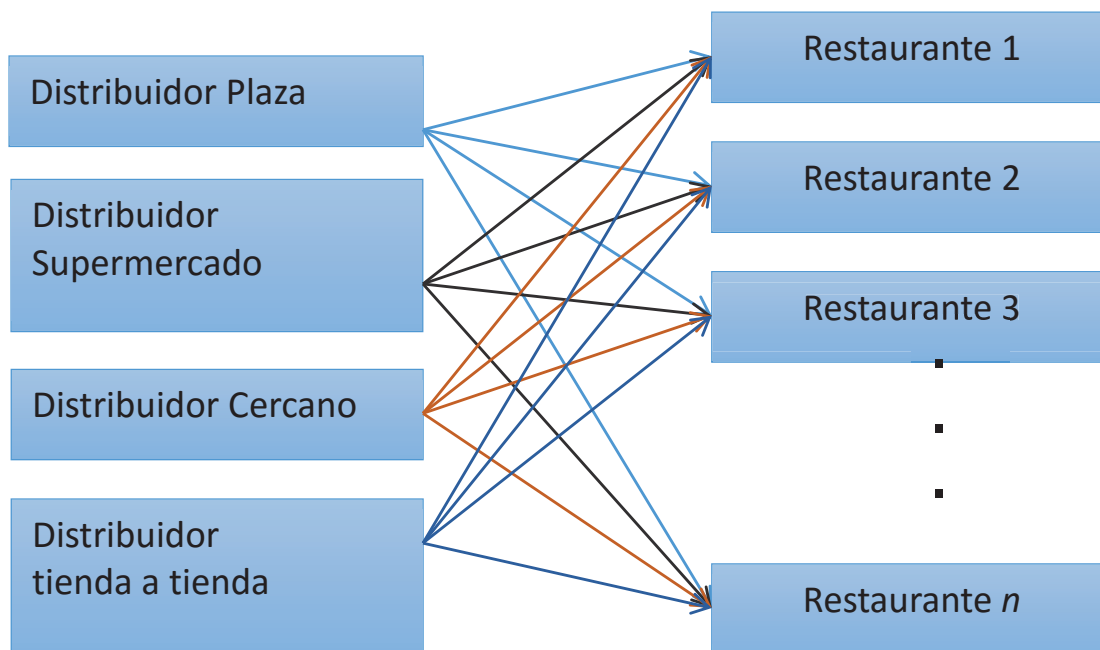
- **Visita Plaza Minorista:** se mantiene la ubicación de la fuente de la mercancía, pero en este caso un distribuidor se encargará de recoger los productos de dicha plaza, para

posteriormente ser transportados hasta los clientes. Este distribuidor será nombrado como Distribuidor Plaza.

- **Supermercados:** se considera el supermercado de cadena más cercano a la zona de estudio, para lo cual se mantiene la ubicación, pero similar a lo propuesto para la plaza minorista, un distribuidor se encarga de recoger los productos en el supermercado para su posterior desplazamiento hacia los clientes. Este distribuidor será nombrado Distribuidor Supermercado.
- **Tiendas:** las tiendas, como se mencionó anteriormente, presentan varios inconvenientes que los hacen poco atractivos para hacer parte de un enfoque empresarial, donde su único potencial es la cercanía a los clientes, lo cual se puede suplir con un sistema de gestión de inventario y transporte adecuado, que permita controlar los niveles de inventario y responder rápidamente a cualquier demanda inesperada. En este caso se considera un nuevo distribuidor que aglomere las órdenes de los clientes y que se encuentre cercano a la zona de estudio, el cual se encargará de abastecer los clientes de acuerdo a sus necesidades. Este distribuidor será nombrado como Distribuidor Cercano.
- **Distribuidor tienda a tienda:** este constituye el distribuidor identificado por los restaurantes y su funcionamiento se mantiene tal y como realiza su operación. Para efectos de modelamiento, este proveedor será ubicado cercano a la ciudad, equidistante al distribuidor Plaza y al distribuidor Supermercado.
- **Transportador:** en el proceso de abastecimiento de alimentos en la ciudad de Medellín se encontró que la mayoría de los procesos de transporte se realizan con medios propios por parte de los restaurantes, en donde solamente el distribuidor utilizaba sus vehículos. En el esquema propuesto, en el cual los clientes son abastecidos directamente en sus instalaciones, se requiere un conjunto de vehículos para la distribución, los cuales serán gestionados por la administración central del proceso de abastecimiento. Estos vehículos debido a la estructuración de la propuesta serán subcontratados a una empresa de transporte, en cuya instalación se iniciara cada ruta para el abastecimiento.

En la figura 20 se presenta el esquema de distribución entre actores del sistema de distribución de alimentos para la ciudad de Medellín propuesto.

Figura 20. Actores del proceso de distribución colaborativo propuesto.



Fuente: Elaboración propia.

Para el proceso de distribución se seleccionaron el conjunto de productos de mayor demanda por parte de los restaurantes de la ciudad de Medellín, los cuales son la papa común, la arepa y el huevo. En el anexo A se presenta la identificación de los alimentos más demandados para la ciudad de Medellín, obtenido a partir del Plan de Abastecimiento y Distribución de Alimentos para la ciudad de Medellín (PADAM), elaborado por la Universidad Nacional de Colombia para la Alcaldía de Medellín en el año 2011 (PADAM, 2011).

La propuesta de distribución, tal y como se plantea en el capítulo 4 de esta tesis doctoral, debe incluir elementos decisionales estratégicos, tácticos y operativos, los cuales permitan una real integración de los actores y un proceso de distribución que cumpla con los objetivos definidos. Los elementos identificados para las capas estratégica y táctica son presentados en la tabla 9. Los elementos de la operación del modelo, en donde se contempla la información de entrada, el procesamiento de la información y la solución al modelo con las condiciones establecidas se presentan más adelante.

Tabla 9. Elementos de las capas estratégica y táctica de la propuesta de distribución

Capa	Elemento	Descripción
Estratégico – Táctico	Objetivo	Desarrollar un proceso de distribución de mercancías mediante la colaboración en el inventario de 4 proveedores y 21 clientes, de forma que de manera simultánea se minimicen los costos de transporte, los costos de inventario, el número de viajes y se maximice el nivel de servicio.
Estratégico	Selección de Actores	Los actores seleccionados son: <ul style="list-style-type: none"> • Proveedores: Distribuidor Plaza, Distribuidor Supermercado, Distribuidor Cercano y distribuidor tienda a tienda. • Clientes: 21 restaurantes identificados en la zona de estudio. • Transportador: Empresa subcontratada para el transporte de la mercancía desde los proveedores a los clientes.
	Mecanismo de Colaboración	Asociación empresarial: Corresponde a una asociación de empresas, en las cuales todas las partes inicialmente comparten la información del proceso de aprovisionamiento para lograr desarrollar un sistema de distribución colaborativa. Sin embargo en esta etapa no se realizan elementos de inversión conjunta y tampoco relacionamientos a largo plazo. En procesos futuros, en los cuales se haya validado los beneficios de la propuesta y desee ampliar el proceso de colaboración, se pueden conformar alianzas estratégicas y redes de suministro legalmente constituidas.
	Tipo de Colaboración	Colaboración lateral: La colaboración requerida contempla acuerdos entre los clientes y acuerdos entre los distribuidores (acuerdos en cada uno de los eslabones). Además, la información compartida en el eslabón de los clientes debe colaborar con los proveedores y recíprocamente, lo cual conlleva a colaboración lateral. Es importante notar que el enfoque de colaboración se basa en el VMI, por lo cual los planes de reabastecimiento son responsabilidad del proceso de colaboración de los proveedores.
Táctico	Elementos de colaboración	<p>Colaboración del inventario: mediante la colaboración en el inventario se realiza la asignación conjunta de los planes de reabastecimiento para los clientes a partir de los proveedores mediante el modelo VMI. La información requerida para la colaboración es:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Demanda. • Precios de compra de producto. • Niveles de inventario. • Costos de inventario. • Capacidad máxima de almacenamiento. • Capacidad de producción de los proveedores. • Política de inventario. • Percepción del nivel de servicio. • Demanda desatendida. <p>Colaboración en el transporte: Luego de definir los planes de reabastecimiento se requiere transportar las mercancías de forma consolidada para todos los clientes, realizando colaboración tipo Pooling, en el cual un conjunto de vehículos es compartido para llevar mercancías de varios clientes.</p> <p>Colaboración en Administración: la actividad de planificación del proceso asignación de inventario y transporte se debe realizar de manera colaborativa entre los proveedores o por un ente externo que realice dichas funciones por ordenanza de los proveedores, tal y como lo establece el modelo VMI. En este sentido el proceso de colaboración es administrado de forma colaborativa, para la planificación, organización, ejecución y control del proceso de distribución colaborativa de los 4 proveedores y los 21 clientes.</p> <p>La colaboración en instalaciones no se lleva a cabo en la propuesta de distribución, toda vez que cada actor utiliza sus recursos (a excepción de la información y el transporte de la mercancía) de manera independiente.</p>

Capa	Elemento	Descripción
Táctico	Funciones Objetivo	De acuerdo a lo estipulado en el objetivo de la propuesta, las funciones objetivos del modelo son: <ul style="list-style-type: none"> • Minimizar los costos de transporte. • Minimizar los costos de inventario. • Minimizar el número de viajes. • Maximizar el nivel de servicio. Las ecuaciones utilizadas para cada uno de estas funciones objetivos corresponden a las presentadas del modelo en el capítulo 4.
Táctico	Proceso de planificación	Para la planificación del proceso de distribución se deben seguir varios pasos, los cuales comprenden actividades desde la adquisición de la información hasta la evaluación del desempeño del plan de distribución, los cuales son descritos a continuación: <ol style="list-style-type: none"> Solicitud de la información. Recepción y verificación de la información. Procesamiento de la información. Aplicación del modelo de optimización. Establecimiento del plan de distribución. Evaluación del desempeño. Dentro de los elementos clave del proceso de planificación se encuentra la definición de la política de inventario, que con el objetivo de disminuir el número de viajes se adaptará el modelo order-up-to level, que significa abastecer hasta el nivel máximo de almacenamiento en las instalaciones de los clientes. Para la medición del desempeño del proceso de distribución, se utilizan varios indicadores de gestión, que se encargan de medir el comportamiento de las variables de cada una de las funciones objetivo y otros indicadores generales. El conjunto de indicadores a medir son: <ul style="list-style-type: none"> • Porcentaje de utilización de los vehículos. • Número de vehículos utilizados. • Cantidad promedio de inventario en un ciclo de abastecimiento. • Costo del transporte. • Conto de inventario. • Emisiones totales de CO₂ • Número de viajes (trayectos).
Táctico - Operacional	Proceso de optimización	El proceso de optimización para determinar los planes de abastecimiento colaborativo para los 4 proveedores y 21 clientes se realiza mediante la aplicación del modelo multiobjetivo presentado en el capítulo anterior y que reúne todos los elementos definidos en las etapas estratégica y táctica

Fuente: Elaboración propia.

5.1.1 Características, parámetros de entrada y recursos del modelo genético multiobjetivo.

Las características del modelo propuesto para la optimización operativa son presentadas en el capítulo 4 y para su solución se utiliza el modelo genético multiobjetivo presentado en capítulo 3.

El primer elemento de los parámetros de entrada del modelo genético multiobjetivo son las ubicaciones de los clientes y de los proveedores, los cuales son presentados en el mapa de

la zona de estudio para la aplicación del modelo, tal y como se muestran en la figura 21, en la cual los clientes son marcados con puntos de color rojo y los proveedores con puntos de color morado. El punto geo referenciado (latitud y longitud) para cada uno de estos actores se presenta en la tabla 10.

Figura 21. Mapa de las posiciones de los proveedores y clientes.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Posición Geo referenciada de las posiciones de los clientes y los proveedores.

Actor	Punto	Georreferenciación	Punto	Georreferenciación
Clientes	P1:	6.249821, -75.567746	P12	6.248847, -75.574083
	P2:	6.247957, -75.564584	P13	6.247963, -75.575454
	P3:	6.251505, -75.561672	P14	6.248903, -75.576137
	P4:	6.252188, -75.563517	P15	6.254971, -75.573637
	P5:	6.255871, -75.570939	P16	6.251883, -75.569801
	P6:	6.249482, -75.561900	P17	6.257402, -75.570482
	P7:	6.246948, -75.563063	P18	6.255802, -75.567060
	P8:	6.244708, -75.564200	P19	6.256026, -75.564785
	P9:	6.244724, -75.564818	P20	6.253274, -75.564903
	P10:	6.247790, -75.569641	P21	6.254661, -75.574864
	P11:	6.247077, -75.573235		
Proveedores	D1	6.258358, -75.573951	D3	6.245720, -75.559617
	D2	6.256257, -75.582459	D4	6.249614, -75.577862

Fuente: Elaboración propia.

El punto D1 corresponde al proveedor plaza, D2 al proveedor supermercado, D3 al proveedor cercano y el D4 al proveedor tienda a tienda. Los puntos marcados en el mapa no corresponden a la ubicación exacta de los actores, con el fin de conservar en secreto su identidad.

La información asociada a la demanda de cada cliente para el consolidado de los tres productos estudiados (papa, arepa común y huevo) es presentada en la tabla 11 y la información del inventario inicial, inventario máximo y costos de inventario para cada uno de los clientes es presentada en la tabla 12. Estos valores se actualizaron al año 2016 utilizando el crecimiento demográfico de la ciudad y el Índice de precios al consumidor (IPC) según datos de la Alcaldía de Medellín (Alcaldía de Medellín, 2015) y del Departamento Administrativo Nacional de Estadística - DANE (DANE, 2016), respectivamente. Los tiempos definidos por los clientes para la recepción de la mercancía son presentados en la tabla 13.

Tabla 11. Demanda para cada uno de los clientes

Cliente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Demanda (kg)	93	85	79	63	72	91	66	81	72	76	92	90	65	80	94	86	66	69	92	88	83

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Inventario inicial, inventario máximo y costos de inventario para cada cliente.

Cliente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Inventario Inicial (kg)	26	26	20	14	9	4	5	11	14	23	4	24	3	6	24	30	16	10	41	14	31
Inventario Máximo (kg)	193	217	160	162	167	196	151	191	169	154	187	209	131	194	205	237	147	143	203	201	224
Costo Inv. Promedio(\$/Kg)	74,1	91,5	71,8	95	101,8	91,4	93,6	65,6	85,2	88,5	73,2	90,2	85,6	98,9	82,7	85,1	73,1	67,3	97	89,8	92,9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Ventanas de tiempo para atención de los clientes.

Franja horaria	Cualquier hora (6am-18pm)	6am-10 am	10 am -14 pm	14 pm-18 pm
Clientes	4, 15, 18	1,2, 5,6,7,8,9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 21	Ninguno	3

Fuente: Elaboración propia.

Las ventanas de tiempo expresadas en minutos y considerando el límite inferior (a) y límite superior (b) para cada cliente se presentan en la tabla 14, junto con el tiempo de procesamiento

requerido para su atención. Para el cálculo de estas ventanas de tiempo se emplea una jornada laboral de 8 horas, según la ley, la cual comprende desde las 7 am hasta las 11:30 y desde las 1:00 pm hasta las 4 pm. En esta jornada se asume un tiempo promedio de carga del vehículo de 1 hora, un tiempo al final de las rutas de 1 hora para reporte y aseo del vehículo, un tiempo de una hora de almuerzo y 30 minutos ociosos previos al almuerzo. De esta forma las rutas inician a las 8:00 a.m. y finalizan a las 3:00 p.m.

Tabla 14. Ventanas de tiempo de atención a los clientes expresadas en minutos

Cliente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Wa (minutos)	0	0	360	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wb (minutos)	120	120	420	420	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	420	120	120	420	120	120	120
Tiempo Procesamiento	22	19	21	17	25	19	25	24	16	15	21	23	15	25	19	18	21	23	15	24	19

Fuente: Elaboración propia.

Para los proveedores, los costos de inventario, el inventario inicial y la capacidad de producción semanal se presentan en la tabla 15. Aunque el costo del manejo de inventario en los proveedores es diferente, se estableció un valor igual para los mismos, de forma que en el análisis de los costos ninguno se vea afectado.

Tabla 15. Inventario inicial, costos de inventario y capacidad de producción de los proveedores.

Proveedor	Costo Inventario (\$/kg)	Inventario Inicial Proveedor (kg)	Capacidad de producción (kg/semana)
D1	50	2550	1700
D2	50	2550	1700
D3	50	2550	1700
D4	50	2550	1700

Fuente: Elaboración propia.

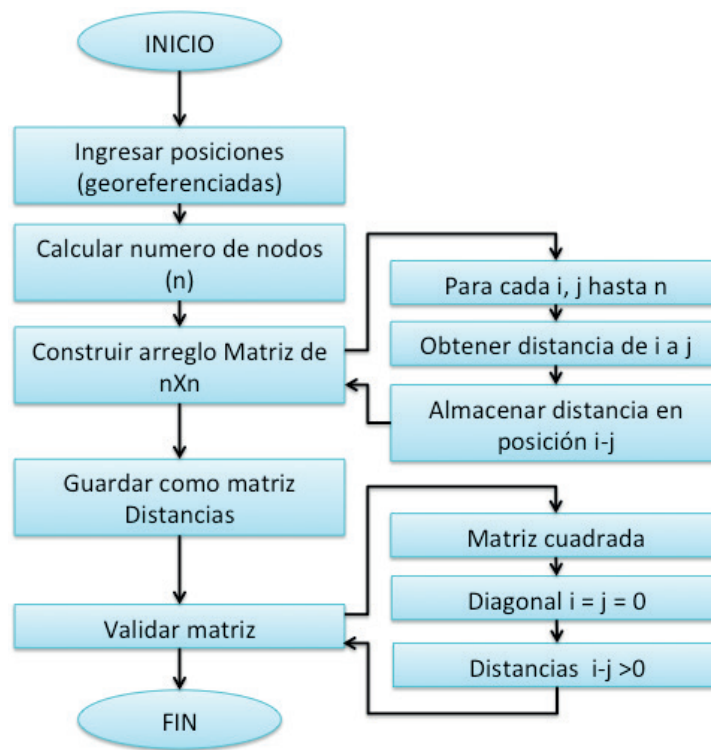
Para el transporte de la mercancía se utilizarán vehículos de carga tipo Van, los cuales son especialmente útiles para la distribución de mercancías en la ciudad. Se dispondrán de tantos vehículos como se requieran, de forma que se visite cada proveedor individualmente. Estos vehículos son seleccionados por su amplia utilización en sistemas de distribución urbana de

mercancías, los cuales tienen una capacidad de 899 kg netos y poseen un motor TCDi (turbo diésel) de 2.2 Litros y una potencia de 100 Caballos de Vapor (Ford Motor Company, 2016).

5.2 Aplicación del modelo

Para la aplicación del modelo de distribución de mercancía colaborativa propuesto en el sistema de distribución urbana de alimentos en la ciudad de Medellín presentado anteriormente, se desarrollaron dos algoritmos que corren bajo el lenguaje JAVA utilizando el entorno de programación NetBeans®. El primer algoritmo tiene como objetivo calcular la matriz de distancias requeridas para el modelo de optimización multiobjetivo. Para calcular la matriz de distancias este algoritmo usa la interfaz de programación de aplicaciones de Google maps para Java, el cual mediante las clase Geocoding y getRoute permite calcular las distancias reales desde dos puntos con base en su posición georreferenciada (Google, 2016). La figura 22 presenta una representación gráfica de los pasos del algoritmo utilizados para calcular la matriz de distancias.

Figura 22. Algoritmo para el cálculo de la matriz de costos.



Fuente: Elaboración propia.

La relación de variables y fuentes de información utilizadas en el modelo es presentado en el anexo B. La matriz de distancias es cuadrática y además asimétrica, ya que las distancias para ir desde un punto a otro son diferentes cuando se realiza el recorrido en el sentido contrario, debido a las condiciones de los sentidos y a las restricciones de movilidad en las vías de la ciudad. La matriz de distancias obtenidas para el caso de distribución de 21 clientes y 4 proveedores es presentada en el Anexo C.

El segundo algoritmo corresponde al programado para el modelo genético de optimización multiobjetivo, basado en el algoritmo genético NSGAII, el cual como se mencionó en el capítulo 3 es inédito para la optimización de procesos de distribución urbana de mercancías, a partir del cual es posible encontrar solución al modelo propuesto para resolver el problema operativo de la distribución colaborativa de mercancías que permite optimizar de manera simultánea los costos de inventario y transporte, el número de ventanas de tiempo incumplidas y el número de viajes requeridos en proceso de distribución de mercancías de múltiples proveedores y múltiples clientes. El modelo genético y sus características son presentados en el capítulo 3 y el código de programación en el lenguaje JAVA para el algoritmo principal se presenta en el anexo D.

5.2.1 Proceso de coordinación para la aplicación del modelo

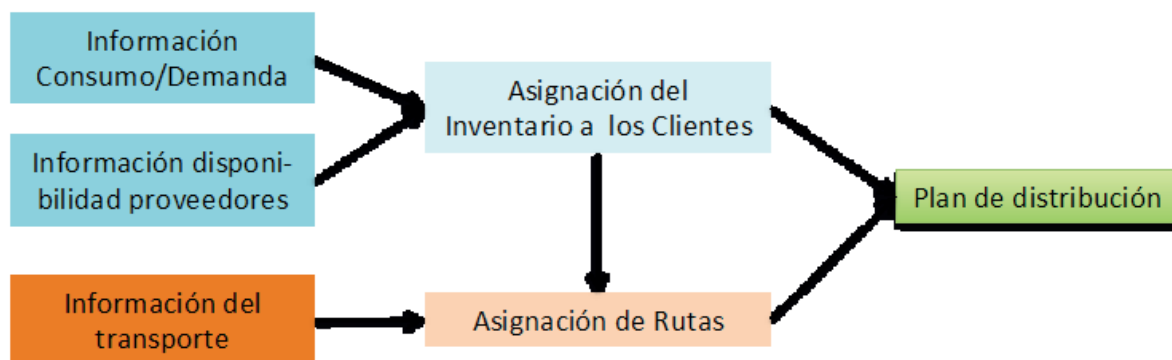
De acuerdo a lo presentado en el capítulo 4, antes de la aplicación del modelo multiobjetivo para la optimización de la distribución de mercancías de m proveedores con n clientes presentado en esta tesis doctoral, es necesario definir el proceso de coordinación entre los actores de forma que se logre procesar la información de manera colaborativa para luego generar los planes de distribución requeridos, en los cuales se debe definir las cantidades de materiales para el reabastecimiento de cada cliente y las rutas para el abastecimiento desde cada uno de los proveedores involucrados en la red de distribución.

El modelo multiobjetivo propuesto en esta tesis doctoral, como se mencionó en el capítulo 4, se fundamenta en la colaboración del inventario a través de la estrategia del Inventario Manejado por el Vendedor (VMI), por lo cual los datos de consumo, demandas, disponibilidad de productos en los proveedores, capacidades de almacenamiento y demás información requerida por el modelo debe ser compartida entre clientes y proveedores, para que posteriormente el proveedor (en conjunto con los clientes, si es el caso de VMI colaborativo) se encargue de realizar las decisiones de asignación de las cantidades de reabastecimiento y de ruteo para el transporte de las mercancías y la posterior ejecución de los planes de distribución establecidos.

La coordinación para la asignación del inventario y las rutas es el insumo para la aplicación del modelo genético multiobjetivo propuesto en la presente tesis doctoral, el cual se basa en el modelo IRP, que utiliza el VMI como elemento central para asignar las cantidades de reaprovisionamiento y el ruteo de los vehículos en los planes de distribución. La asignación del inventario para cada cliente y la determinación de las rutas a seguir para transportar dichas mercancías puede realizarse de dos formas: Asignación individual del inventario y el transporte, y asignación conjunta del inventario y del transporte.

En la asignación individual del inventario y las rutas, a partir de la información de demanda, disponibilidades y costos se asignan la cantidades de mercancías que debe ser enviada a cada uno de los clientes para asegurar el cumplimiento de sus demandas y evitar pérdidas de ventas, buscando disminuir los costos de inventario tanto en las instalaciones de los clientes como en los proveedores. Posterior a la asignación del inventario se generan las rutas que deben seguir los transportadores para abastecer los clientes con las cantidades de mercancía definidas (Azuma et al., 2011). En la figura 23 se representa el método de asignación individual del inventario y el transporte.

Figura 23. Esquema de asignación de inventario y transporte individual



Fuente: Elaboración propia.

Para la red de distribución utilizada en la aplicación del modelo multobjetivo propuesto en esta tesis doctoral, correspondiente a la distribución de alimentos en la zona centro de la ciudad de Medellín, compuesto por 4 proveedores, 21 clientes y 5 periodos, la asignación del inventario se puede realizar utilizando una matriz que indica la cantidad de mercancías que debe ser llevada a cada cliente desde cada proveedor para el periodo correspondiente, tal y como se muestra en la tabla 16 para valores de inventario asignados de forma aleatoria.

A partir de esta asignación del inventario se producen las rutas para la distribución de las correspondientes cantidades.

Tabla 16. Matriz para asignar el inventario utilizando asignación individual de inventario y rutas.

Periodo	Proveedor	Cliente																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Periodo 1	P1	27		57															42	37		
	P2		3									72					62	82				
	P3				93	60	90	23	43	49	59	96										
	P4													20	39	86					66	40
Periodo 2	P1	95		62															100	24		
	P2		98									5					47	65				
	P3				74	40	42	24	16	37	70	48										
	P4													37	75	76					13	79
Periodo 3	P1	38		71															51	19		
	P2		74									42					55	67				
	P3				41	10	16	70	68	1	37	65										
	P4													11	83	33					14	5
Periodo 4	P1	86		92															75	75		
	P2		21									62					50	75				
	P3				94	83	26	68	4	53	69	62										
	P4													82	11	28					86	64
Periodo 5	P1	45		75															80	59		
	P2		98									48					72	8				
	P3				17	96	44	7	75	45	85	23										
	P4													24	35	10					67	75

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el método de asignación conjunta del inventario y las rutas de transporte, las cantidades de inventario para cada uno de los clientes y las rutas son definidas de forma simultánea, para lo que se requiere un procedimiento que constantemente genere asignaciones del inventario y las rutas a partir de dichas cantidades, las evalúe y seleccione aquellas que generen un proceso de distribución lógico y factible (Arango *et al.*, 2016). La representación de este método, el cual es el utilizado por el modelo genético multiobjetivo propuesto en esta tesis doctoral para la coordinación del inventario y de las rutas, es representado en la figura 24 y se ejecuta utilizando una matriz compuesta de dos partes: En la primera se asignan las cantidades de inventario a cada cliente y en la segunda se definen de forma simultánea rutas para la distribución en cada periodo, tal y como se muestra en la tabla 17.

Figura 24. Esquema de asignación de inventario y transporte conjunta.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 17. Matriz de asignación conjunta de inventario y rutas.

Periodo	Proveedor	Cliente																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Periodo 1	Cantidad	27	3	57	93	60	90	23	43	49	59	96	72	20	39	86	62	82	42	37	66	40
	P1	1	3	18	19																	
	P2	2	12	16	17																	
	P3	4	5	6	7	8	9	10	11													
	P4	13	14	15	20	21																
Periodo 2	Cantidad	95	98	62	74	40	42	24	16	37	70	48	5	37	75	76	47	65	100	24	13	79
	P1	1	3	18	19																	
	P2	2	12	16	17																	
	P3	4	5	6	7	8	9	10	11													
	P4	13	14	15	20	21																
Periodo 3	Cantidad	38	74	71	41	10	16	70	68	1	37	65	42	11	83	33	55	67	51	19	14	5
	P1	1	3	18	19																	
	P2	2	12	16	17																	
	P3	4	5	6	7	8	9	10	11													
	P4	13	14	15	20	21																
Periodo 4	Cantidad	86	21	92	94	83	26	68	4	53	69	62	62	82	11	28	50	75	75	75	86	64
	P1	1	3	18	19																	
	P2	2	12	16	17																	
	P3	4	5	6	7	8	9	10	11													
	P4	13	14	15	20	21																
Periodo 5	Cantidad	45	98	75	17	96	44	7	75	45	85	23	48	24	35	10	72	8	80	59	67	75
	P1	1	3	18	19																	
	P2	2	12	16	17																	
	P3	4	5	6	7	8	9	10	11													
	P4	13	14	15	20	21																

Fuente: Elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 17, en la primera fila de cada periodo (resaltada con un tono oscuro) se asigna el inventario a cada cliente y en las siguientes 4 filas se presentan la secuencia de la ruta que debe seguirse desde cada proveedor y la cantidad a llevar a cada cliente, corresponde a la asignada en la fila 1. De esta forma, en el periodo 1 y para el proveedor 2, la ruta es: proveedor 1-cliente 2 – cliente 12 – cliente 16 –cliente 17 y proveedor 1, llevando una cantidad de mercancía de 3, 72, 62 y 82 para los clientes 2, 12, 16 y 17 respectivamente.

La estructura de la matriz presentada en la tabla 17, en la cual se presenta la asignación conjunta del inventario y las rutas de transporte para una red compuesta por múltiples proveedores, es una propuesta innovadora desarrollada en esta tesis de doctorado y que no ha sido utilizada previamente en otro trabajo realizado para optimizar la distribución de mercancías de forma colaborativa, de acuerdo a lo encontrado en la literatura científica especializada. Como se mencionó anteriormente, este método de coordinación del inventario y las rutas es el utilizado para el modelo de optimización propuesto en esta tesis doctoral, por lo cual el algoritmo genético utiliza una representación del individuo similar a lo presentado en la tabla 17, tal y como puede observarse en el capítulo 3.

5.3 Resultados del modelo multiobjetivo

El modelo genético multiobjetivo propuesto fue corrido utilizando una población de 200 individuos, con una probabilidad de mutación de 0,2, utilizando los operadores descritos en el capítulo 3 y con valores de generaciones de 200, 300, 500 y 1000, encontrándose una convergencia de los resultados cuando se utilizó 500 generación. Corridas con número de generaciones superiores a 500 no mostraron mejoras significativas en el conjunto de individuos de solución obtenidos y significan un aumento injustificado de los tiempos de cómputo del algoritmo.

Después de más de 15 corridas, el mejor conjunto de solución obtenido está compuesto por 14 individuos, que corresponden a la frontera Pareto del problema multiobjetivo analizado. Esta solución fue seleccionada entre las otras corridas con base en los valores de las tres funciones objetivo y el número de individuos de las soluciones, encontrada con un número de generaciones de 500. En la tabla 18 se presenta el valor de los tres objetivos optimizados de manera simultánea para cada uno de los individuos de la solución del problema.

Tabla 18. Mejores individuos obtenidos con el modelo genético multiobjetivo.

Individuo	Costo	Ventana	Trayectos
1	151.358	5	120
2	158.204	4	92
3	164.640	3	93
4	169.297	3	81
5	168.519	3	84
6	165.034	3	89
7	166.464	4	87
8	168.356	4	82
9	164.803	3	90
10	172.872	3	80
11	173.924	4	78
12	185.145	3	77
13	174.539	3	78
14	186.405	3	76

Fuente: Elaboración propia.

Cada una de estas soluciones hace parte del conjunto de NO dominancia y puede ser utilizada por el tomador de decisiones para ejecutar el plan de distribución de alimentos de forma colaborativa para la red de clientes y proveedores tenidos en cuenta en la aplicación del modelo. El administrador puede seleccionar indistintamente cualquiera de las soluciones, de acuerdo a sus preferencias y estar seguro que ninguna de las soluciones es mejor que otra para el problema de distribución resultado. Cada uno de estos individuos entrega los planes de distribución, el cual está compuesto por la cantidad de mercancía a enviar desde cada proveedor a los clientes y la secuencia de las rutas requeridas para este fin, de acuerdo a lo definido en el proceso de coordinación mencionado anteriormente y reflejado en la representación de los individuos presentada en el capítulo 3.

La figura 25 presenta el individuo solución número 1 de la tabla 18, el cual corresponde al individuo solución que genera el menor costo de inventario y de transporte. La minimización de este objetivo genera el resultado contrario en los otros objetivos, siendo este individuo número 1 la peor solución con respecto al número de ventanas de tiempo insatisfechas y el número de trayectos requeridos.

**Figura 25. Individuo número 1 del conjunto de solución.
Individuo de menor costo**

[67, 59, 59, 49, 63, 87, 61, 70, 58, 53, 88, 66, 62, 74, 70, 56, 50, 59, 51, 74, 52]
[17, 5, 16, 21, 10, 15]
□
[3, 4, 18, 2, 7, 8, 1, 6, 9, 20, 19]
[13, 12, 11, 14]
[93, 85, 79, 63, 72, 91, 66, 81, 72, 76, 92, 90, 65, 80, 94, 86, 66, 69, 92, 88, 83]
[16, 21, 5, 17, 10, 15]
□
[8, 9, 6, 3, 7, 4, 1, 2, 18, 20, 19]
[14, 11, 13, 12]
[93, 85, 79, 63, 72, 91, 66, 81, 72, 76, 92, 90, 65, 80, 94, 86, 66, 69, 92, 88, 83]
[21, 15, 16, 17, 5, 10]
□
[2, 8, 9, 4, 18, 3, 1, 7, 19, 20, 6]
[11, 12, 13, 14]
[93, 85, 79, 63, 72, 91, 66, 81, 72, 76, 92, 90, 65, 80, 94, 86, 66, 69, 92, 88, 83]
[5, 10, 17, 21, 15, 16]
□
[20, 18, 19, 6, 8, 7, 1, 3, 9, 4, 2]
[14, 12, 13, 11]
[93, 85, 79, 63, 72, 91, 66, 81, 72, 76, 92, 90, 65, 80, 94, 86, 66, 69, 92, 88, 83]
[17, 5, 21, 10, 16, 15]
□
[2, 6, 4, 18, 3, 7, 19, 20, 8, 9, 1]
[14, 12, 11, 13]

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte en la figura 26 se presenta el individuo solución número 14, el cual corresponde al individuo que minimiza el número de trayectos requeridos para la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín, entregando un valor mínimo del número de ventanas de tiempo insatisfechas, pero que corresponde al individuo solución con mayores costos del proceso de distribución.

Como puede observarse de la tabla 18, cada individuo presenta valores diferentes para el conjunto de funciones objetivos a optimizar y debido a que estos objetivos son contradictorios entre sí, la mejora en uno generalmente conlleva al deterioro de otro o del resto de los objetivos, como ocurre con los costos de transporte e inventario, que a medida que se van incrementando, van produciendo mejores resultados para el número de ventanas de tiempo insatisfechas y para el número de trayectos.

**Figura 26. Individuo 14 del conjunto de solución.
Individuo con el menor número de ventanas de tiempo incumplidas**

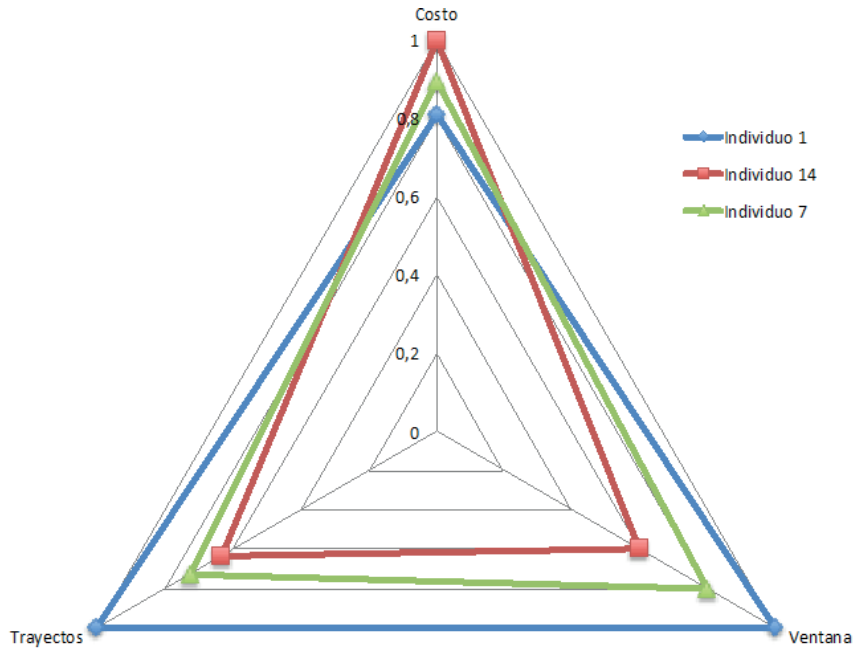
[153, 217, 160, 76, 112, 196, 108, 191, 169, 154, 187, 209, 126, 194, 205, 77, 147, 128, 143, 201, 77]
[17, 21, 16, 10, 15, 5]
[]
[18, 20, 6, 9, 4, 0, 19, 3, 1, 8, 2, 0, 7]
[11, 12, 13, 14]
[193, 12, 136, 162, 167, 164, 151, 122, 105, 51, 85, 37, 131, 120, 147, 237, 35, 0, 92, 137, 224]
[21, 17, 16, 5, 10, 15]
[]
[3, 20, 2, 7, 1, 8, 0, 6, 9, 4, 19, 0]
[11, 14, 12, 13]
[93, 170, 0, 63, 72, 91, 0, 0, 72, 152, 184, 180, 65, 80, 94, 86, 132, 143, 184, 0, 83]
[10, 5, 17, 21, 16, 15]
[]
[1, 6, 9, 18, 19, 2, 4, 0, 0, 0, 0]
[12, 13, 11, 14]
[0, 0, 79, 0, 0, 0, 66, 81, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 64, 0, 88, 0]
[0, 0, 0, 0, 0, 0]
[]
[3, 7, 20, 18, 8, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
[0, 0, 0, 0]
[0, 0]
[0, 0, 0, 0, 0, 0]
[]
[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
[0, 0, 0, 0]

Fuente: Elaboración propia.

La figura 27 presenta un gráfico de radar para los individuos 1, 14 y 7, este último seleccionado por ser un punto intermedio entre los individuos 1 y 14 que presentan individualmente los valores máximo y mínimo de las tres funciones objetivo, tal y como se mencionó anteriormente. El valor de los ejes corresponde al porcentaje del valor máximo de cada una de las tres funciones objetivo optimizadas. La figura 27 muestra como cada individuo solución presenta diferentes valores para las tres funciones objetivo optimizadas y permite observar que el individuo 7 presenta valores que se encuentran entre el máximo y mínimo de cada función a optimizar, correspondiente a un resultado intermedio entre los valores extremos obtenidos con los individuos 1 y 14. El resto de individuos del conjunto solución presenta un comportamiento

similar al encontrado con el individuo 7, correspondiente a resultados intermedios con respecto a los valores máximos y mínimos de las funciones objetivo optimizadas.

Figura 27. Comparación valores objetivo individuos 1, 14 y 7.



Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 19 se presenta la comparativa de los resultados del proceso de distribución producidos por los individuos 1 y 14, en el cual se observan que la minimización de los costos totales de distribución (Individuo 1), se logra haciendo que el inventario en los clientes sean mínimos (iguales a cero), para lo cual se requiere un proceso de transporte intensivo que en cada periodo reabastezca cada cliente con exactamente la cantidad de mercancía que necesita. Esto conlleva al incremento de los costos de transporte, la emisión de gases efecto invernadero, baja utilización de los vehículos y a la necesidad de requerir un alto número de viajes (trayectos) durante el proceso de distribución, así como a la dificultad de cumplir con las ventanas de tiempo establecidas por los clientes. El inventario en cada uno de los clientes y de los proveedores para los periodos del horizonte de planeación producidos por el plan de distribución generado por el individuo 1 es presentado en la tabla 20.

Tabla 19. Comparación resultados producidos por los individuos I y I4

	Individuo I	Individuo I4
Capacidad utilizada vehículo	59,8%	73,0%
Inventario promedio clientes	0	110,7142857
Inventario promedio proveedores	1546,5	1251,5
Costo transporte	21452	14777
Costo Inventario (Proveedor y clientes)	129906	171628
Emisiones CO2 kg Co2	26,57889308	18,30861006
Número de viajes	120	76

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Inventario en los clientes y en los proveedores para el individuo I.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
Periodo 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
periodo 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Periodo 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Periodo 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Periodo 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) Inventario clientes

	P1	P2	P3	P4
Periodo 1	2206	2550	1856	2260
periodo 2	1729	2550	977	1933
Periodo 3	1252	2550	98	1606
Periodo 4	775	2550	919	1279
Periodo 5	298	2550	40	952

(b) Inventario proveedores

Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, el individuo I4 produce un plan de distribución en el cual solamente es necesario abastecer todos los clientes en el primer periodo, pero asignando mayores cantidades a cada uno, lo que permite que en periodos posteriores no sea necesario visitar muchos clientes. En la tabla 19 se muestra como el individuo I4 produce mayores costos totales de inventario,

como producto de entregas mayores en los clientes, lo cual reduce los costos de transporte y de inventario en proveedores, pero que generan un costo total mayor por el efecto de las altas cantidades de mercancía en los clientes. Sin embargo, por efecto de mantener altos niveles de inventario en los clientes se producen menores viajes, emisiones de CO₂, mayor utilización de vehículos y se facilita el cumplimiento de las ventanas de tiempo, al punto que logra obtenerse el valor mínimo para esta función objetivo con las condiciones del proceso de distribución. En la tabla 21 se presenta el inventario en los clientes y proveedores generado por el individuo 14.

Tabla 21. Inventario en los clientes y en los proveedores para el individuo 14

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21
Periodo 1	86	158	101	27	49	109	47	121	111	101	99	143	64	120	135	21	97	69	92	127	25
periodo 2	186	85	158	126	144	182	132	162	144	76	92	90	130	160	188	172	66	0	92	176	166
Periodo 3	186	170	79	126	144	182	66	81	144	152	184	180	130	160	188	172	132	74	184	88	166
Periodo 4	93	85	79	63	72	91	66	81	72	76	92	90	65	80	94	86	66	69	92	88	83
Periodo 5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) Inventario clientes

	PI	P2	P3	P4
Periodo 1	1778	2550	808	1834
periodo 2	917	2550	1234	1461
Periodo 3	298	2550	418	952
Periodo 4	298	2550	40	952
Periodo 5	298	2550	40	952

(b) Inventario proveedores

Fuente: Elaboración propia.

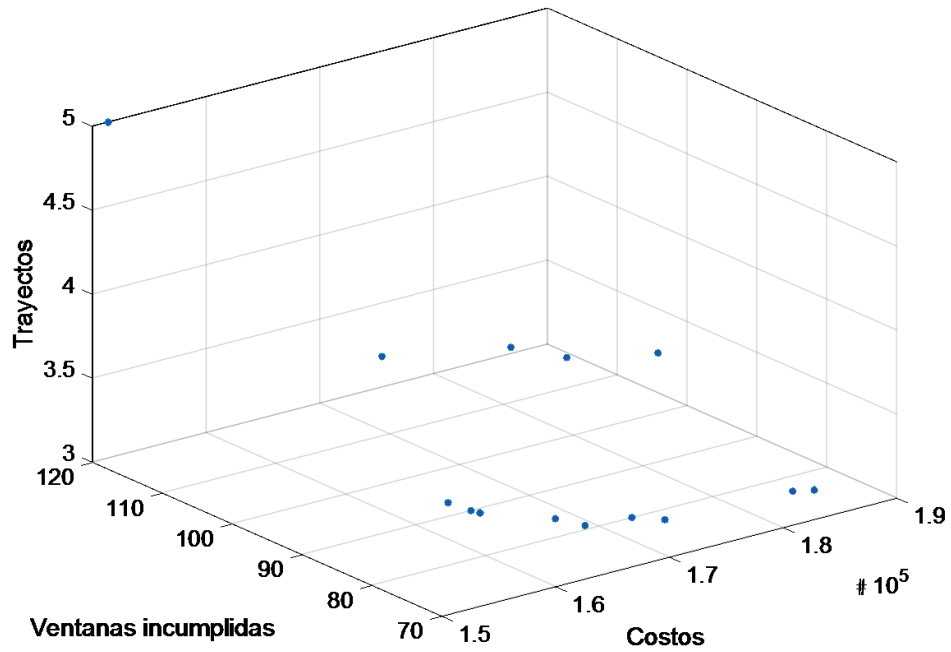
Los resultados para los demás individuos del conjunto solución producen valores intermedios entre los producidos por los individuos 1 y 14 (figura 27), los cuales minimizan de forma individual cada una de las funciones objetivo. Estos individuos son combinaciones óptimas de

los costos de inventario y transporte, incumplimiento de las ventanas de tiempo y el número de trayectos requeridos para el proceso de distribución. Aunque los individuo 1 y 14 son soluciones en los cuales se encuentra el óptimo individual de alguna de las funciones objetivo contempladas en el modelo multiobjetivo, ninguna de estas o del resto de las 12 soluciones es mejor que ninguna otra, ya que estas son soluciones No dominadas y corresponden a soluciones en las que la combinación de los valores de las funciones objetivos son óptimo y no son inferiores en calidad de respuesta que ninguna otra.

Para los individuos 1 y 14 presentados anteriormente en las figuras 25 y 26, se observa que para el proveedor D2 (tercera fila en el periodo), correspondiente al proveedor Supermercado, no hay clientes asignados, lo que se debe a que en el proceso de agrupación de clientes a proveedores no es tenido en cuenta debido a los costos de distribución. Además, cuando los clientes son asignados a este proveedor en la mutación inter-deposito, los individuos con clientes abastecidos desde este proveedor son descartados del conjunto solución, también como producto de los altos costos y dificultades de cumplimiento de ventanas de tiempo.

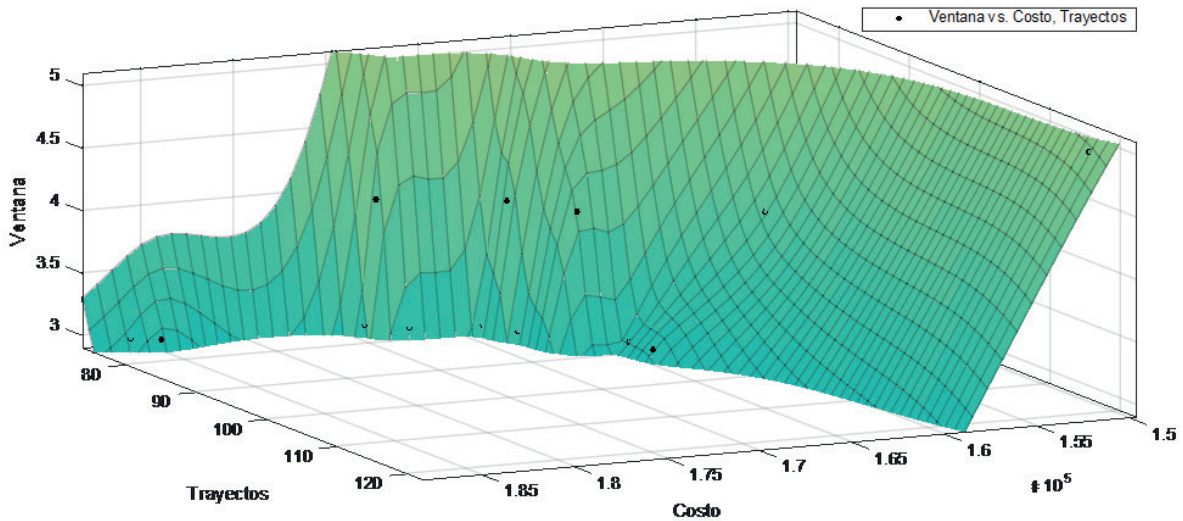
De forma gráfica el conjunto de los individuos de solución son ubicados en el espacio tridimensional cuyos ejes se corresponden con las funciones objetivo a optimizar por el modelo, tal y como se muestra en la figura 28. Con el propósito de mejorar la visualización de la frontera Pareto formada por los individuos solución, en la figura 29(a) se presenta la superficie que se puede formar mediante la extrapolación de los datos. La distribución de los individuos en la frontera Pareto se concentra en la parte media baja de los valores para el número de ventanas de tiempo incumplidas y de número viajes requeridos (Trayectos), pero en la zona media para los valores de los costos de inventario y transporte. Alejado a este grupo de concentración de los valores de los individuos solución, se encuentra el individuo 1, el cual genera los menores costos de inventario y transporte, pero produce los valores más altos para el número de ventanas de tiempo incumplidas y del número de viajes (trayectos) requeridos.

Figura 28. Frontera Pareto y superficie conformada por las soluciones del problema.

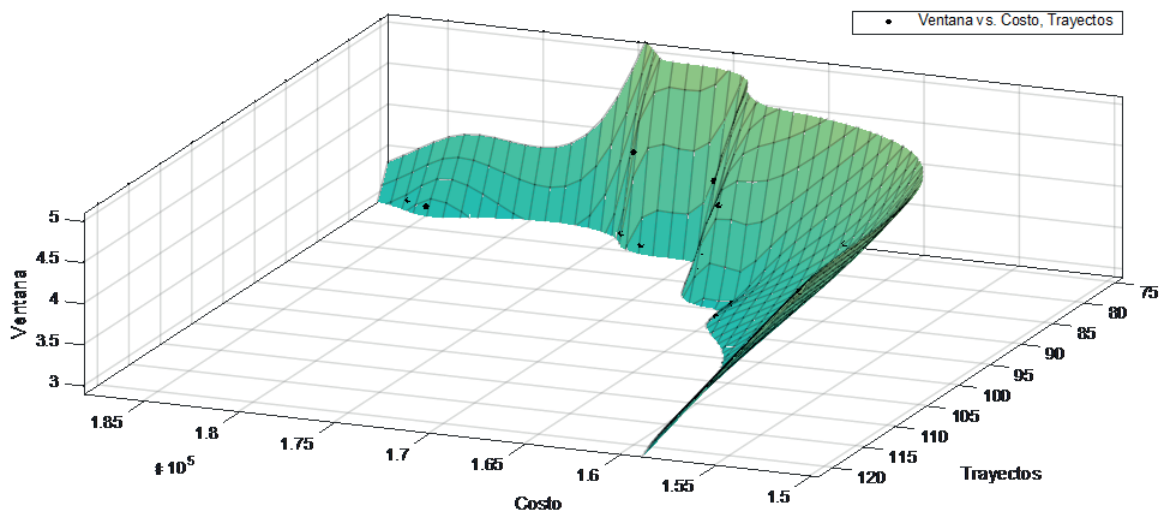


Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Superficie formada con la extrapolación de los valores de las soluciones



(a)



(b)

Fuente: Elaboración propia.

Esto indica que la mayoría de los individuos NO dominados se concentran en la región del espacio en la que se minimizan las ventanas de tiempo y el número de trayectos, siendo difícil encontrar individuos con valores del costo de inventario y transporte cercanos a su óptimo y con valores de incumplimientos y número de viajes bajos. De esta forma, optimizar los costos de inventario y transporte es posible mediante el individuo solución número 1, pero utilizar planes de distribución con costos cercanos a su valor mínimo incurriría en el deterioro de alguna de las otras funciones objetivo de acuerdo a lo entregado por el modelo genético multiobjetivo. Debido a que para el individuo 1 el número de ventanas de tiempo incumplidas y el número de trayectos requeridos presenta los peores valores obtenidos por el resto de los individuos del conjunto solución, si el tomador de decisión decide utilizar un individuo que genere valores de estas funciones objetivo un poco mejores, debe estar dispuesto a sacrificar una gran parte en los costos.

De forma similar se observan los individuos 12 y 14 ubicados en la zona de la gráfica en que el número de ventanas de tiempo y el número de trayectos son mínimos, pero que los costos de transporte e inventario son máximos. Esto significa que si el tomador de decisiones decide utilizar planes de distribución que minimicen los trayectos y de forma conjunta las ventanas de tiempo debe asumir un aumento significativo en los costos.

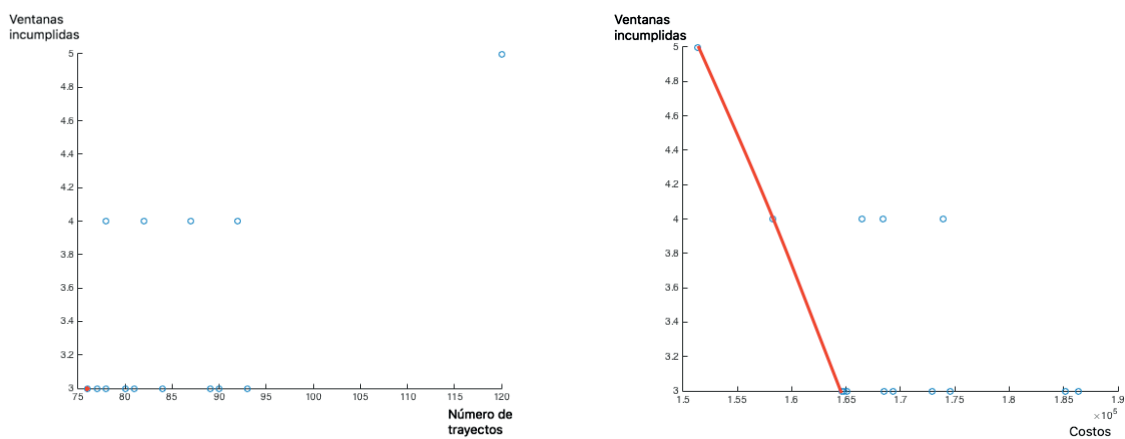
Como se mencionó anteriormente, la mayoría de los individuos se centran en la zona centro bajo de la figura 29(a), lo que es favorable para el tomador de decisiones que desee utilizar

sistemas de distribución que compense las tres funciones objetivo, encontrando un amplio número de soluciones óptimas que cumplen con esta condición.

La figura 29(b) presenta una vista desde otro punto del espacio tridimensional, la cual permite corroborar el comportamiento de frontera producido por los individuos solución, dejando ver un comportamiento predominante cóncavo a medida que se incrementan los costos de inventario y transporte. Detalladamente puede observarse como ningún individuo solución en la frontera producida presenta mejores valores en las tres funciones objetivo que algún otro individuo solución, lo que demuestra y permite visualizar el concepto de no dominancia entre los individuos solución entregados por el modelo genético multiobjetivo propuesto en esta tesis doctoral.

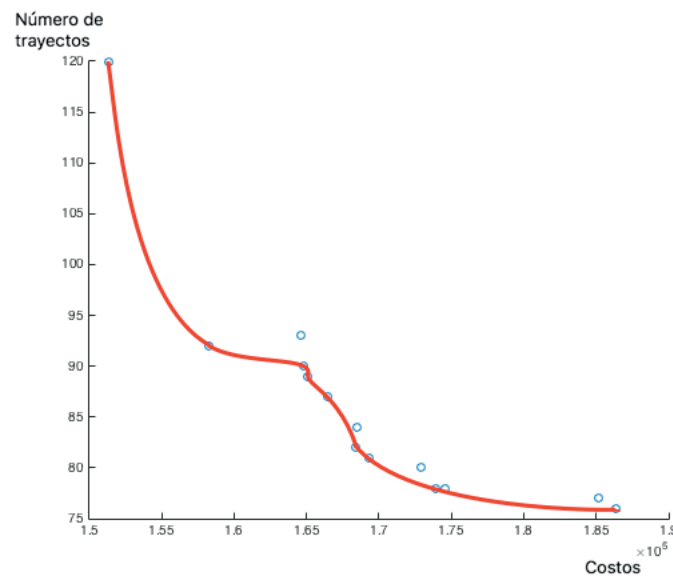
El resultado también puede ser estudiado desde el punto de vista de la frontera que se forma al graficar las funciones objetivo por pares, disminuyendo una dimensión al análisis (Tušar y Filipić, 2015). La figura 30 se presenta la frontera que se produce al graficar las ventanas incumplidas vs el número de trayectos requeridos (a), las ventanas no incumplidas vs el costo (b), y los trayectos necesarios vs los costos (c) de transporte e inventario, en las cuales mediante una línea roja se resalta la frontera Pareto que se forma al unir los individuos solución óptimos para cada par de funciones objetivo. El comportamiento de cada una de las fronteras producidas es el esperado para funciones en las cuales se busca su minimización. Es importante aclarar a modo de recordación, que en este caso el nivel de servicio se está evaluando en función del número de ventanas de tiempo insatisfechas, por lo cual para su optimización se busca la minimización de dicha variable, que significa la maximización del nivel de servicio.

Figura 30. Fronteras Pareto desde cada par de funciones objetivos



(a) Ventanas incumplidas vs Trayectos

(b) ventanas incumplidas vs costo



(C) Trayectos vs costos

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 30(a) se puede observar que para la minimización de las ventanas de tiempo incumplidas y el número de trayectos necesarios el número de individuos no dominados es tan solo 1, correspondiente al individuo 14 en el cual se obtiene el menor número de trayectos junto con el menor número de ventanas de tiempo incumplidas. En la figura 30(b) se muestra que la frontera Pareto correspondiente a la minimización del número de ventanas de tiempo incumplidas y los costos de distribución, la cual está compuesta por tres individuos y presenta un comportamiento levemente convexo, en la cual es posible identificar el individuo 1 que corresponde al punto para el mayor valor de las ventanas de tiempo incumplidas y que genera el menor costo de transporte e inventario.

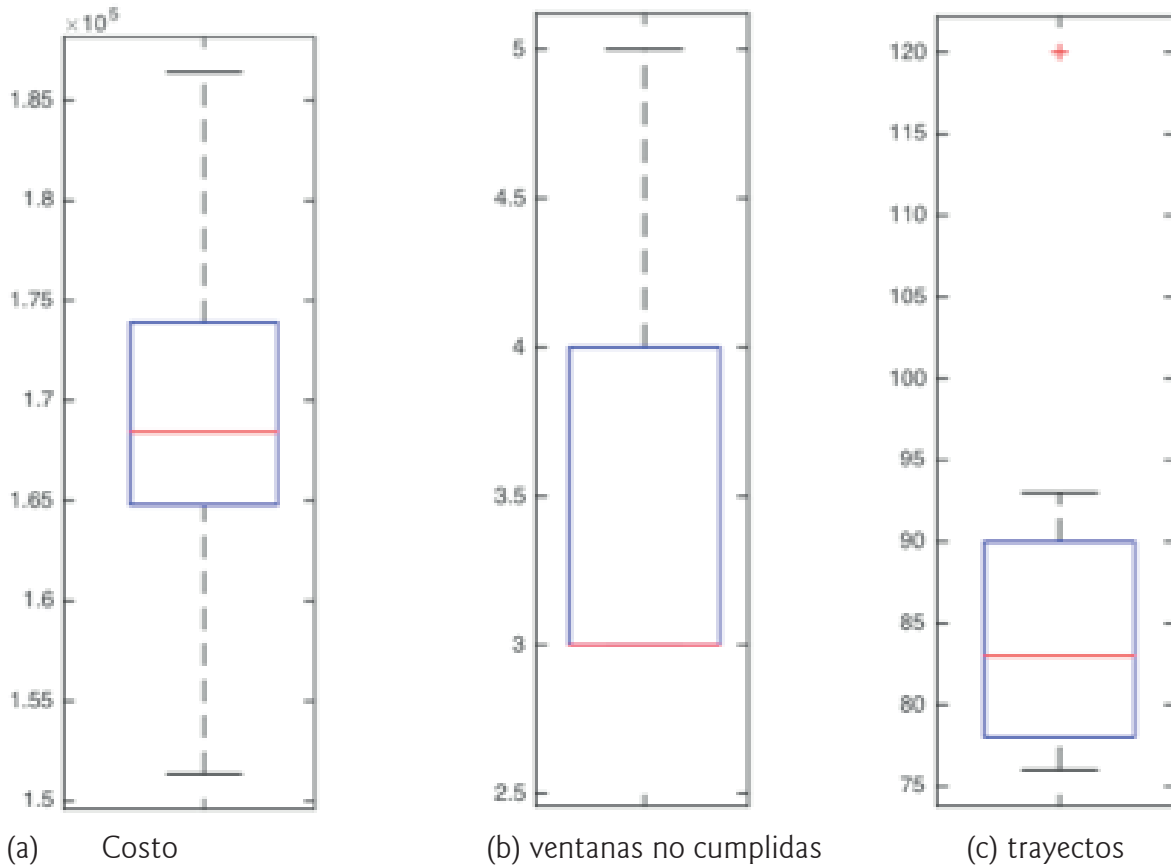
En la figura 30(c) se muestra la frontera Pareto para las funciones objetivo del número de trayectos y costos de inventario y transporte, la cual se forma por múltiples individuos concentrados en la parte media-baja de los valores para el número de trayectos y en la parte media alta para los valores de los costos de distribución, permitiendo identificar también el individuo 1 que presenta el mejor valor para el objetivo de la disminución de los costos, pero que corresponde al peor para la minimización del número de trayectos requeridos. A partir del análisis en dos dimensiones de cada una de las fronteras mostradas en las figuras 30(a), 30(b) y 30(c), se explica la razón por la que la superficie tiende a perder altura en la región de valores

máximo para los costos y mínimo para el número de ventanas incumplidas y de trayectos, lo cual se debe a que solo existe un individuo no dominado para las funciones número de trayectos y ventanas de tiempo, el cual es la solución 14 en donde termina la gráfica en esta zona. El comportamiento curvado y levemente convexo de la superficie se explica por el comportamiento de las fronteras para los pares número de trayectos – costos y número de ventanas incumplidas – costos, respectivamente. El comportamiento de las fronteras Pareto es acorde a lo esperado, los cuales justifican la dispersión de los puntos y la forma de la superficie formada en el espacio tridimensional presentados en las figuras 28, 29(a) y 29(b).

Continuando con el análisis de las soluciones producidas por el modelo genético multiobjetivo, se estudió la variabilidad las funciones objetivo optimizadas, de la cantidad del inventario, y de la asignación de las mercancías a cada uno de los clientes. Para esto se utilizó diagrama de caja (BoxPlot) que permiten identificar la mediana y la distribución de los valores en cada uno de los cuartiles para cada una de las variables estudiadas.

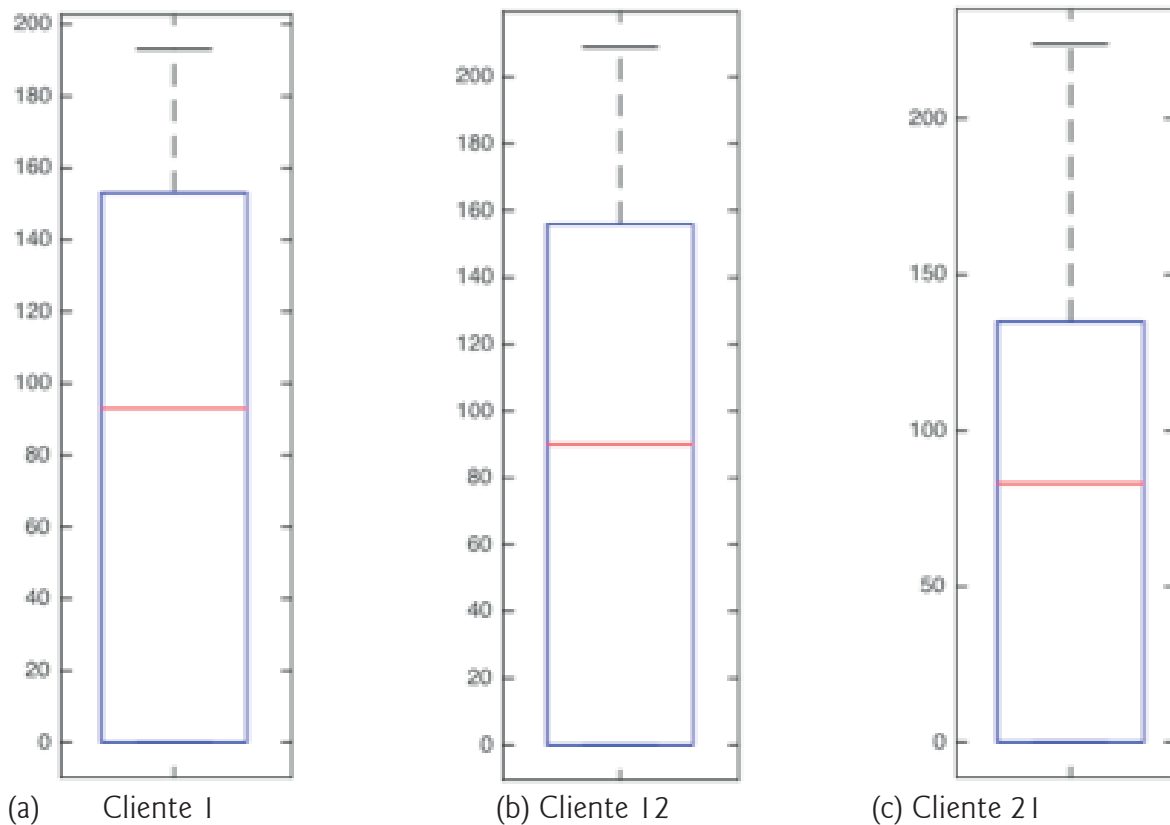
En la figura 31(a) se presentan los diagramas de caja para el valor del costo, las ventanas no cumplidas 31(b) y el número de trayectos requeridos 31(c), obtenidos con el análisis de los 14 individuos del conjunto solución. En la figura 31 (a) se observa que el valor mínimo y máximo de los costos corresponden a \$151.358 y \$186.405, con una mediana alrededor de los 180.000 y con valores distribuidos casi simétricamente. La figura 31(b) presenta la distribución de las ventanas de tiempo incumplidas, en la cual se observa un valor máximo de 5 ventanas incumplidas y un mínimo de 3, el cual corresponde a la mediana, toda vez que la mayoría de los individuos presentan este valor. Esta distribución de los valores para esta variable se debe a que el modelo genético multiobjetivo es capaz de alcanzar el número de ventanas incumplidas mínimas posible con las condiciones de operación y solo en los casos en que la optimización de las otras funciones lo requiera, se incumple un mayor número de ventanas de tiempo. La figura 31(c) presenta el diagrama de caja para el número de viajes (trayectos) requeridos, el cual presenta un comportamiento casi simétrico alrededor de la mediana que tiene el valor de 84. De este grafico se observa que a excepción del individuo 1, que produce un número de 120 ventanas incumplidas, las demás soluciones tienen valores entre 93 y 76. El comportamiento de la distribución de los valores de las funciones objetivo para los 14 individuos del conjunto de solución corresponde a lo mencionado anteriormente a partir de las figuras 28 y 29.

Figura 31. Variabilidad del valor las funciones objetivo en el total de los individuos.



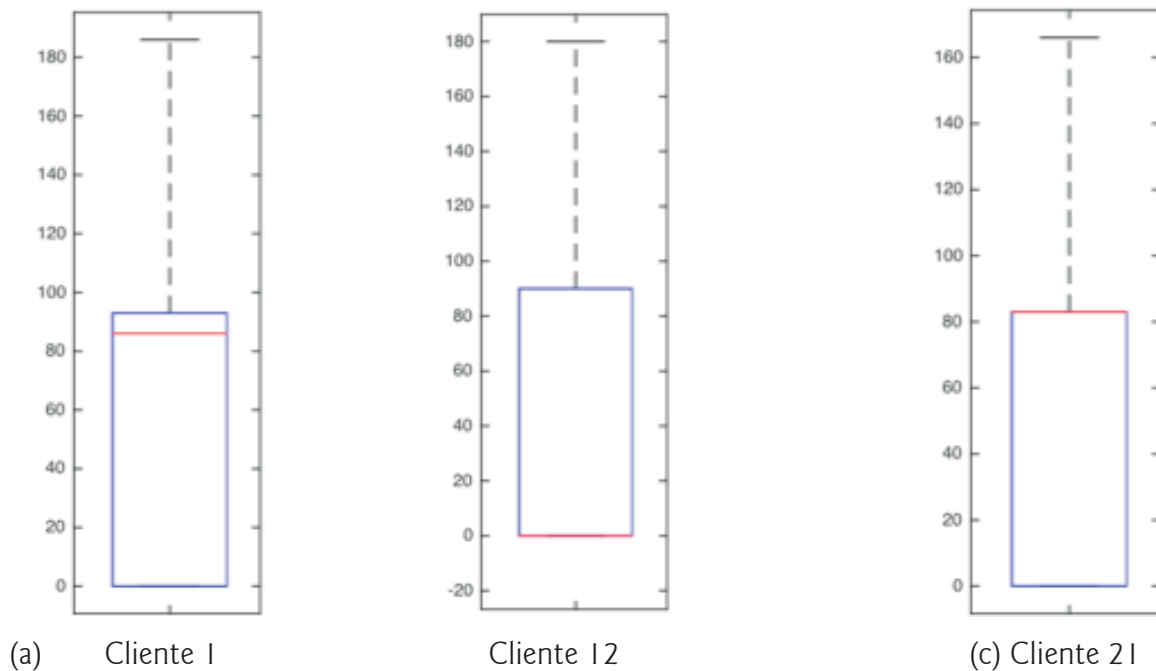
Fuente: Elaboración propia.

La figura 32 presenta los diagramas de caja para analizar la variabilidad de las cantidades de inventario asignado para el reabastecimiento de los clientes 1, 12 y 21, como una muestra de los 21 clientes involucrados en el caso de distribución de estudio en esta tesis doctoral. Diagramas de caja similares pueden ser construidos para el resto de los clientes del proceso de distribución. En la figura 32 se observa que la asignación del inventario para los clientes varía desde cero hasta el valor máximo indicado para cada cliente, lo cual demuestra que el modelo genético tiene la capacidad de realizar grandes variaciones en la asignación del inventario para buscar la optimización de los objetivos propuestos. El hecho de que en los tres clientes seleccionados el primer cuartil corresponda al valor de cero inventario asignado, significa que en muchos casos los planes de distribución producidos por los individuos de solución no envían mercancía a los clientes, lo cual permite optimizar de manera conjunta las tres funciones objetivo.

Figura 32. Variabilidad de la cantidad de inventario asignado para los clientes 1, 12 y 21.

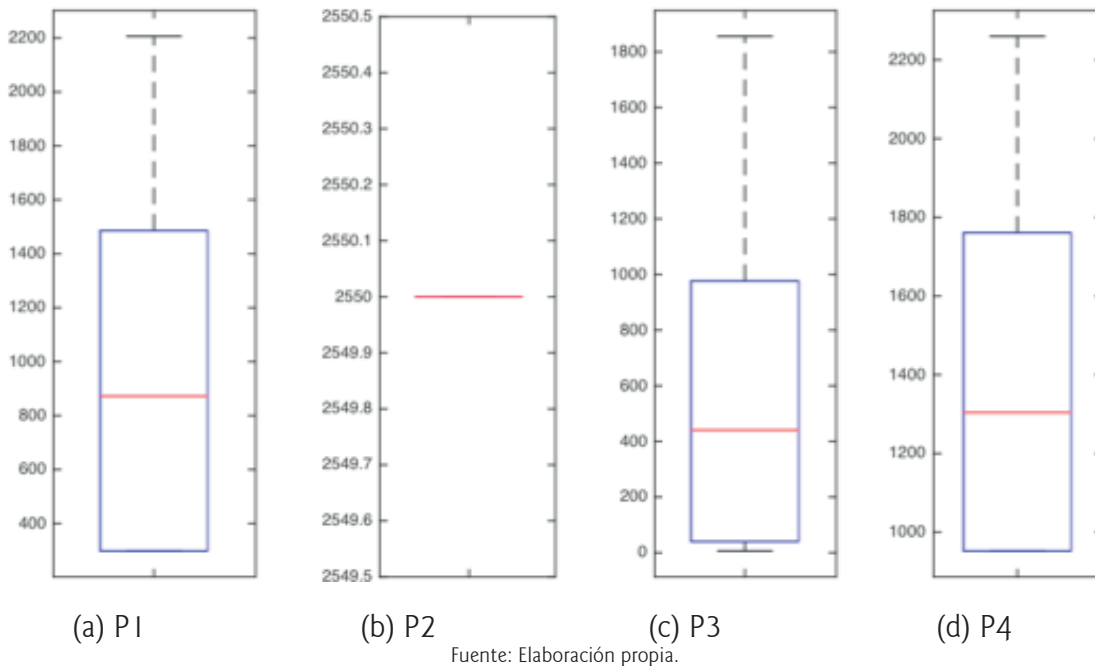
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 33 se presenta el diagrama de caja para la cantidad de inventario en el cliente 1 (figura 33a), cliente 12 (figura 33b) y cliente 21 (figura 33c), en los cuales se observa que la mayoría de los datos se distribuyen entre los cuartiles 2, 3 y 4, con valores que varían entre 0 y 180 aproximadamente para el cliente 1 y 12, y entre 0 y 165 para el cliente 21. Mediante esta variación en los inventarios se logra que algunos individuos requieran más o menos operaciones de reabastecimiento entre periodos, lo que permite que se puedan disminuir los costos de inventario y transporte, las ventanas de tiempo incumplidas y el número de trayectos requeridos. Diagramas de caja similares pueden ser construidos para el resto de los clientes del proceso de distribución. Los faltantes de mercancía en todos los clientes, que ocurren cuando existe alguna demanda insatisfecha, es igual a cero en todos los periodos para los 14 individuos de la solución entregados por el modelo. Esto se debe al cumplimiento de la política de asegurar el abastecimiento de los clientes y generando como consecuencia una mejora del nivel de servicio.

Figura 33. Variabilidad de la cantidad de inventario en los clientes 1, 12 y 21.

Fuente: Elaboración propia.

De forma similar a lo realizado para evaluar el inventario en los clientes, la figura 34 presenta los diagramas de caja para evaluar variabilidad en la cantidad de mercancías que se requiere mantener en cada uno de los 4 proveedores que hacen parte de la red de distribución de alimentos en la ciudad de Medellín estudiada. En la figura 34(a), 34(c) y 34(d) se presentan los diagramas de caja para los proveedores D1 (proveedor plaza), D3 (proveedor cercano) y D4 (proveedor tienda a tienda), en los cuales se observan variaciones normales en los inventarios de los proveedores, encontrándose que para estos tres proveedores la mayoría de los datos se ubican en el tercer y cuarto cuartil, con variaciones de los valores de inventario entre 500 y 2200 kg para el proveedor D1, entre 40 y 1900 kg para el proveedor D3 y entre 900 y 2300 kg para el proveedor D4, lo que demuestra la participación activa de estos proveedores en la red de distribución. Por su parte en la figura 34(b), en la cual se muestra el diagrama de caja para el inventario en el proveedor D2, se observa que este valor es constante en 2550 kg para todos los individuos solución. Esta cantidad corresponden al inventario inicial de dicho proveedor, la cual no varía ya que como se mencionó anteriormente, debido a los costos este distribuidor no es tenido en cuenta en el proceso de distribución, siendo mejor para el sistema abastecer los clientes desde los tres proveedores restantes.

Figura 34. Distribución del inventario en los proveedores.

En resumen, en las figuras 32, 33 y 34 se observa la variabilidad entre los individuos en la asignación del inventario y en las cantidades de producto en las instalaciones de los clientes y proveedores, lo cual es completamente normal, ya que los individuos son soluciones diferentes y óptimas al problema de distribución estudiado, por lo cual cada individuo tiene asociado valores diferentes de las variables, a partir de lo cual se logra la optimización simultánea de las funciones objetivos del modelo.

5.4 Comparación de los resultados con el proceso actual de distribución

Con el objetivo de analizar el desempeño del modelo en la estructuración del proceso de distribución urbana de mercancía, se realiza la comparación de los resultados obtenidos con el modelo versus los resultados de simular el comportamiento del proceso de distribución con las condiciones actuales, es decir, sin realizar el proceso de colaboración. La simulación se realiza utilizando la misma herramienta de programación (JAVA), en la cual se utilizan las condiciones de distribución definidas para los actores sobre el proceso de distribución y se obtienen los resultados con respecto a los costos y el número de trayectos requeridos. En el caso de la distribución con las condiciones actuales, no se considera el análisis de las ventanas de tiempo, ya que en la mayoría de los casos el abastecimiento se realiza por parte de los mismos clientes.

Los resultados obtenidos mediante la simulación para el inventario en cada uno de los clientes y los proveedores son presentados en la tabla 22. Estos niveles de inventario son calculados utilizando la política de inventario de clientes, los cuales ordenan la cantidad requerida para abastecer la demanda prevista en cada periodo y contemplando un inventario de seguridad. El inventario de seguridad es calculado con promedio diario de la demanda, un tiempo de aprovisionamiento de 7 días (1 semana, correspondiente a un periodo) y con probabilidad de cumplimiento del 95%.

Los recorridos para el abastecimiento se realizan de forma independiente por cada cliente y son calculados como la distancia de ir a cada proveedor y su respectivo regreso. Los resultados del costo de transporte y del inventario en los clientes y proveedores, así como del número de trayectos para el proceso de distribución actual obtenidos mediante la simulación, son presentados en la tabla 23.

Tabla 22. Resultados simulación del proceso de distribución con condiciones actuales.

Cliente/ Proveedor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	P1	P2	P3	P4
Periodo 1	105	101	98	90	94	104	91	99	94	96	104	103	91	98	105	101	91	93	104	102	100	2216	2125	1914	2262
Periodo 2	105	101	98	90	94	104	91	99	94	96	104	103	91	98	105	101	91	93	104	102	100	1882	1700	1278	1974
Periodo 3	105	101	98	90	94	104	91	99	94	96	104	103	91	98	105	101	91	93	104	102	100	1548	1275	642	1686
Periodo 4	105	101	98	90	94	104	91	99	94	96	104	103	91	98	105	101	91	93	104	102	100	1214	850	6	1398
Periodo 5	105	101	98	90	94	104	91	99	94	96	104	103	91	98	105	101	91	93	104	102	100	880	425	1070	1110

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Costos de inventario, transporte y número de trayectos con las condiciones actuales.

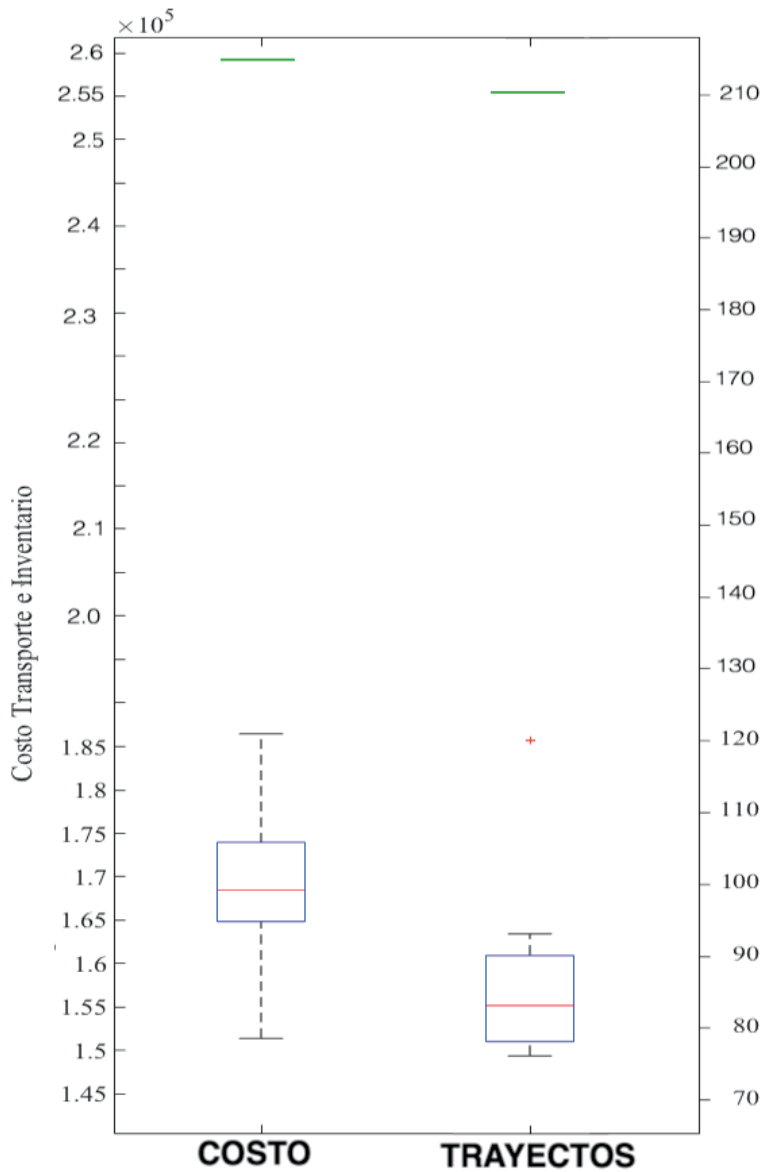
Costo Transporte	72030
Costo Inventario Clientes	73453
Costo Inventario Proveedores	114395
Costo Total	259.878
Número trayectos requeridos	210

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos para el proceso de distribución con las condiciones actuales son inferiores en significancia matemática para los costos y número de trayectos, con respecto

a los valores producidos por las soluciones del modelo, ya que los valores de cada una de estas variables son superiores a los máximos obtenidos por los individuos del conjunto de solución entregado por el modelo multiobjetivo, tal y como se muestra en la figura 35, en donde se compara la distribución de los costos del transporte e inventario y los trayectos para los individuos del conjunto solución con respecto a los valores obtenidos para el sistema de distribución con las condiciones actuales.

Figura 35. Comparación resultados proceso actual con resultados del modelo multiobjetivo.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 35 los valores de los costos de transporte e inventario y el número de trayectos para las condiciones actuales se marcan con líneas verdes, los cuales se observan que son superiores a los valores máximos para cada una de estas funciones objetivos encontrados con cualquiera de los individuos solución producidos por el modelo genético multiobjetivo. La diferencia entre los valores obtenidos para la distribución con las condiciones actuales y con las condiciones de la propuesta obtenida a partir del modelo multiobjetivo, demuestra la calidad de respuesta del modelo con respecto a los costos y a la reducción del número de viajes requeridos. Adicionalmente, con el modelo multiobjetivo se incrementa el nivel de servicio entregado a los clientes, ya que se cumplen las ventanas de tiempo e impide que haya clientes sin mercancías, mejorando su satisfacción.

De acuerdo al modelo multicapa presentado en el capítulo 4, una vez establecido el modelo operativo para la optimización propuesta, se requiere realizar un proceso de evaluación para retroalimentar el comportamiento de los planes de abastecimiento. En este sentido, en la tabla 24 se presentan los indicadores definidos en el modelo multicapa para los individuos solución I y I4, los cuales optimizan individualmente cada una de las tres funciones objetivo y los valores de los indicadores para las condiciones actuales del proceso de distribución.

Tabla 24. Indicadores de gestión para el monitoreo de la distribución colaborativa.

	Individuo I	Individuo I4	Proceso actual
Número vehículos periodo	3	4	21
Capacidad utilizada vehículo	59,8%	73,0%	No definida
Inventario promedio clientes	0	110,7	98,3
Inventario promedio proveedores	1.547	1.252	1.373
Costo transporte	21.452	14.777	72.030
Costo Inventario (Proveedor y clientes)	129.906	171.628	187.848
Emisiones CO2 kg Co2	26,6	18,3	48,2
Número de viajes	120	76	210

Fuente: elaboración propia.

Un aspecto importante que se deriva de la figura 35 y de la tabla 24, es la reducción del número de trayectos, los cuales pasan de 210 con el modelo actual a 120 en la solución de menor calidad en esta función objetivo. Esto de por si genera una reducción en el numero de vehículos circulantes por la ciudad, pero debe ser contrarrestado con las distancias requeridas

para el proceso de distribución, tanto para las condiciones actuales como para las condiciones que producen las soluciones del modelo. De esta forma, calculando las distancias para las condiciones actuales y para los individuos reportados en la tabla 24, utilizando el factor de 159 \$COP/km, utilizado para el cálculo del costo y reportado en el anexo B, la distancias requerida para las condiciones actuales es 453 km, para el individuo 1 es 134,9 km y para el individuo 14 es 92,9 km

Con base en lo anterior, teniendo en cuenta que no solo se reducen el número de trayectos sino también las distancias requeridas para el proceso de distribución en la ciudad y de acuerdo a lo mencionado por Lui et al. (2008) quienes establecen que “La única forma de evitar los efectos de la congestión de tráfico, es reduciendo las distancias innecesarias de transporte”, queda claro el aporte positivo que las soluciones del modelo genético multiobjetivo desarrollado pueden generar en la disminución de la congestión del tráfico en las ciudades, ya que se requieren menos vehículos circulantes y menores distancias de viaje mediante la distribución colaborativa de mercancías.

El cálculo de las emisiones de CO₂ se utilizó tomando como referencia el valor reportado por Ford Motor Company (2016) para el modelo de vehículo propuesto en el transporte de mercancías en la ciudad, el cual es 190-197 gCO₂/km, para condiciones de transporte en ciudad. Para el proceso con las condiciones actuales se asume vehículos con una emisión equivalente a la mitad, debido al tamaño de los vehículos utilizados en estas condiciones, que tal y como lo menciona PADAM (2011) se realiza con automóviles.

En la tabla 24 se observan las variaciones de cada uno de estos indicadores con respecto a los diferentes individuos, en los cuales se sigue el patrón de que el menos costoso es el que genera mayores impactos negativos para la ciudad, aumentando el número de viajes (con las menores utilidades del vehículo) y la cantidad de CO₂ emitida al ambiente. La solución más económica se origina por el hecho de lograr disminuir a cero el inventario en las instalaciones de los clientes. Con relación al proceso de distribución con las condiciones actuales, se observa que los indicadores son en general peores en calidad que para los individuos solución generados por el algoritmo, encontrándose que solo el inventario en los clientes y proveedores no presentan valores superiores comparado con todos los individuos solución, lo cual se subordina ante menores costos, emisiones y número de viajes requeridos en los planes de distribución generados por dichos individuos.

Los anteriores resultados, que han sido presentados a lo largo de este capítulo, confirman que la mejora del sistema de distribución se logra mediante la colaboración del inventario en las empresas participantes (múltiples proveedores y múltiples clientes) del proceso de distribución urbana de mercancías, lo que valida el modelo genético propuesto, así como permite concluir sobre el total cumplimiento de los objetivos propuestos para esta tesis doctoral.

En este capítulo se presentó la aplicación del modelo genético multiobjetivo para la distribución colaborativa de mercancías en la zona centro de la ciudad de Medellín, a partir del cual se logró optimizar de manera simultánea los costos de transporte e inventario, el nivel de servicio y el número de viajes requeridos para la distribución urbana de mercancías, produciendo soluciones a dicho problema de distribución, que al ser comparadas con la forma como el proceso es realizado actualmente, genera mejores resultados en cada uno de las funciones objetivo mencionadas.

Con la aplicación es posible comprobar la capacidad del modelo genético multiobjetivo para resolver el problema de la distribución urbana de mercancías mediante el inventario colaborativo de m proveedores con n clientes, lo que permite argumentar el cumplimiento de los objetivos propuestos en el desarrollo de esta tesis doctoral. En el capítulo siguiente se presentan las conclusiones y recomendaciones más relevantes que han surgido en este proyecto de investigación doctoral.

6 Conclusiones

Una vez analizados el conjunto total de elementos de esta tesis doctoral, es posible concluir sobre múltiples elementos relacionados con la colaboración entre empresas, el modelo genético multiobjetivo formulado y los resultados obtenidos, así como se puede identificar un conjunto de líneas futuras de investigación, las cuales podrán generar nuevo conocimiento en la aplicación de modelos de colaboración para resolver problemas de distribución de mercancías tanto en entornos urbanos como interurbanos.

6.1 Conclusiones

En esta tesis doctoral se propuso un modelo genético de optimización matemática multiobjetivo para minimizar el número de viajes, los costos de transporte, el inventario del sistema y maximizar el nivel de servicio en la distribución de mercancías en logística de ciudad, mediante inventarios colaborativos de m proveedores con n clientes, el cual fue validado exitosamente en la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín, se puede concluir que se ha logrado a cabalidad el cumplimiento del objetivo general y los objetivos específicos propuestos para el desarrollo de esta tesis doctoral.

El modelo genético multiobjetivo propuesto en esta tesis doctoral, el cual se basa en el algoritmo NSGAI (NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II), permite generar el conjunto de soluciones No dominadas que corresponden a la frontera Pareto del problema de distribución de alimentos en la ciudad de Medellín, el cual ha sido corrido múltiples veces para 200 individuos y 500 generaciones, produciendo un conjunto de 14 individuos no dominados, los cuales mejoran el proceso de distribución cuando se compara con los costos de transporte e inventario y el número de viajes requeridos para el sistema de distribución tal y como se realiza en la en la ciudad de Medellín. Los valores obtenidos para cada uno de los 14 individuos

encontrados con el modelo genético multiobjetivo con respecto a la minimización de los costos de transporte e inventario y el número de trayectos, son inferiores a los valores producidos con las condiciones actuales. Además, las soluciones del modelo genético multiobjetivo mediante la asignación del inventario y las rutas de distribución, genera planes de distribución en los cuales el número de faltantes en los clientes durante el horizonte de planificación se vuelve cero. La mejora en costos, nivel de servicio y número de trayectos requeridos se produce como resultado de la colaboración, lo cual demuestra que el modelo logró realizar la asignación del inventario entre múltiples clientes y múltiples proveedores, disminuyendo los costos de transporte e inventario, aumentando el nivel servicio y disminuyendo el número de trayectos requeridos, generando soluciones que mejoran el desempeño del sistema de distribución actual.

A partir de los resultados del proceso de aplicación del modelo, se logra concluir que la colaboración en la cadena de suministros es una estrategia que mejora el desempeño de las empresas a través de acciones conjuntas que permite producir sinergias entre las partes. Para el caso específico del manejo del inventario colaborativo, en las últimas décadas se han propuesto modelos como el reabastecimiento continuo (CR), la Planeación, Pronósticos y Reabastecimiento Colaborativo (CPFR), el inventario en consignación y el inventario manejado por el vendedor (VMI), los cuales han demostrado producir buenos resultados en la reducción de costos para proveedores y clientes.

En la literatura especializada es posible encontrar un gran número de trabajos que estudian la optimización multiobjetivo para el transporte y distribución de mercancías en entornos interurbanos. Sin embargo, cuando se analiza la inclusión del inventario y cuando se estudia la distribución urbana de mercancía, el número de trabajos es limitado. Esto puede ocurrir debido a la especificidad de analizar el inventario en conjunto con el transporte y a las restricciones que deben incluirse, tanto el manejo conjunto de inventario, como para el caso del transporte urbano de mercancía. En los trabajos encontrados al respecto, los objetivos más perseguidos son minimización del costo, tiempo para el abastecimiento, y la maximización del nivel de servicio, ya que al incluir elementos de inventario y condiciones de ciudad, es necesario considerar elementos externos a los costos, como es el caso de la satisfacción de los clientes y la mitigación de los efectos negativos del proceso de distribución en la ciudad. Como ejemplo claro de lo mencionado, en el ruteo de mercancías entre múltiples proveedores y múltiples

clientes, área de investigación ampliamente estudiada utilizando modelos clásicos como el problema de ruteo de vehículos (VRP) y el problema de ruteo y localización (LRP), cuando se analizan procesos de distribución que incluyen el inventario y que utilizan modelos de colaboración entre empresas, su estudio no es exhaustivo, encontrando tan solo una limitada cantidad de trabajos al respecto.

El modelo más utilizado en la literatura científica para el estudio conjunto del transporte y el inventario basado en estrategias de colaboración entre empresas, es el Problema de Ruteo de Inventario –IRP, mediante el cual es posible estudiar sistemas de distribución compuestos por varios depósitos y clientes (sistemas m por n), que basado en el inventario gestionado por el vendedor (VMI), permite asignar el ruteo de vehículos y las cantidades de mercancías en las instalaciones de los clientes y proveedores, reduciendo las cantidades de inventario en el sistema y los costos, tanto de transporte como de inventario.

El modelo multiobjetivo presentado en esta tesis doctoral, con su aplicación en la distribución de alimentos en la zona centro de la ciudad de Medellín, permite evidenciar que para la correcta generación de planes de distribución mediante el VMI, es necesario definir previamente un proceso de coordinación entre proveedores y clientes, a partir del cual, como se soporta en la aplicación de dicho modelo, facilita la asignación y planificación del inventario y el transporte de forma colaborativa, a partir de la información de las empresas y las condiciones de transporte de la red de distribución.

Mediante la optimización multiobjetivo es posible encontrar solución al problema comúnmente enfrentado por académicos y prácticos en logística y administración de cadenas de suministro, sobre como optimizar de manera conjunta los costos de transporte, inventario y el nivel de servicio para la distribución de mercancías. El modelo multiobjetivo propuesto en esta tesis doctoral no solo contempla estos elementos, sino que además incluye un tercer objetivo que pretende reducir el impacto negativo de los procesos de transporte en las ciudades. Para esto se optimizan de manera simultánea tres funciones objetivos: la primera corresponde a la optimización de los costos de transporte e inventario mediante el Problema de Ruteo de Inventario (IRP), la segunda corresponde a la minimización del incumplimiento de las ventadas de tiempo durante el proceso de distribución, como medida para optimizar el nivel de servicio; y la tercera busca minimizar el número de viajes requeridos para el abastecimiento de múltiples clientes desde múltiples proveedores.

En el modelo genético multiobjetivo propuesto en esta tesis doctoral, a partir del cual se logró la optimización simultánea de los costos de transporte e inventario, el nivel de servicio y el número de trayectos requeridos, se utilizó una representación novedosa de los individuos (Cromosoma), la cual permite de manera conjunta realizar la asignación de las cantidades del inventario y las rutas para la distribución de dichas cantidades. Tras una búsqueda exhaustiva en la literatura científica, se encontró que previo al desarrollo de esta tesis doctoral y a la publicación de resultados parciales de la misma, no se encontró una representación de los individuos con estas características. Tanto el enfoque multiobjetivo propuesto, la aplicación del algoritmo NSGAI para solucionar el mismo, como la representación de los individuos, son innovadores y según el conocimiento de los autores, después de la revisión bibliográfica requerida, no se han encontrado trabajos previos publicados con dichas características.

Los resultados obtenidos por el modelo genético en la formulación de planes de distribución de alimentos en la ciudad de Medellín, permiten concluir que mediante su aplicación es posible obtener impactos positivos tanto para las empresas como para la sociedad y el medio ambiente. Desde el punto de vista de las empresas, al lograr disminuirse los costos de transporte e inventario y mejorar el nivel de servicio, es posible obtener mayores niveles de rentabilidad para las mismas. Para la sociedad, la reducción del número de viajes y de las distancias requeridas en los procesos de distribución permitirá aportar a la congestión en las ciudades, a causa de dicha disminución de la intensidad de transporte por parte de las empresas. Desde el punto de vista ambiental y debido a las menores distancias totales requeridas para el transporte de mercancías, las emisiones de gases efecto invernadero se ven disminuidas, impactando positivamente en la reducción de la contaminación ambiental ocasionada por los procesos de distribución de carga.

Mediante el proceso investigativo y con el desarrollo del modelo genético multiobjetivo de optimización matemática para minimizar el número de viajes, los costos de transporte, el inventario del sistema y maximizar el nivel de servicio en la distribución de mercancías en logística de ciudad, se puede concluir que se logró validar las hipótesis propuestas inicialmente en la formulación de la investigación que dio origen a esta tesis doctoral. La tabla 25 presenta cada una de las hipótesis propuestas y justifica la validación de cada una de las mismas.

Tabla 25. Validación de las hipótesis de la investigación

Hipótesis	Justificación de validación
<p>Hipótesis 1: Los modelos de colaboración logística de inventarios permiten disminuir los costos de transporte, el inventario y el número de viajes requerido para satisfacer las necesidades de distribución de mercancías en un sistema de logística de ciudad.</p>	<p>Esta hipótesis se valida con el análisis de la literatura aplicada y con la formulación del modelo, ya que mediante la colaboración de la información sobre el manejo de inventarios (niveles, políticas e información relevante de los clientes y proveedores) es posible que se agrupen las decisiones de transporte y asignación del inventario, que es lo que hace posible la reducción de los costos (tanto de transporte de inventario), mejorar el cumplimiento de ventanas de tiempo en los clientes como medida del nivel de servicio y la reducción del número de viajes, producido por una mejor proceso de distribución como resultado de una mejor asignación del inventario.</p>
<p>Hipótesis 2: Mediante la formulación de un modelo de optimización matemática multiobjetivo es posible encontrar la mejor solución simultánea para un sistema de distribución de mercancías que permita minimizar el número de viajes, los costos de transporte, el inventario del sistema y maximizar el nivel de servicio, mediante inventarios colaborativos de m proveedores con n clientes.</p>	<p>Esta hipótesis se valida con el modelo formulado y la validación del mismo, el cual permite encontrar de forma simultánea un conjunto de soluciones óptimas que combinan diferentes valores de las funciones objetivo mencionadas.</p> <p>La aplicación del modelo demuestra la viabilidad y pertinencia de la aplicación del modelo multiobjetivo propuesto, lo cual fortalece la validez de esta hipótesis, ya que los resultados obtenidos por el modelo son mejores para todos los individuos de solución comparados con los correspondientes para el proceso de distribución con las condiciones actuales.</p> <p>Debido a que estas funciones objetivo son contradictorias entre sí, ya que la mejora de una genera el deterioro de la solución de al menos otra función objetivo, para la formulación de propuestas de solución para este tipo de modelos es necesario utilizar técnicas multiobjetivo, tal y como el modelo presentado en esta tesis doctoral.</p>
<p>Hipótesis 3: Los Algoritmos Genéticos pueden ser usados satisfactoriamente para resolver el problema matemático multiobjetivo de la optimización simultánea del número de viajes, los costos de transporte, el inventario del sistema y el nivel de servicio en el modelo propuesto.</p>	<p>Esta hipótesis se valida con la técnica de solución del modelo, para lo cual se utiliza en algoritmo genético especialmente diseñado para resolver problemas de optimización multiobjetivo. El algoritmo genético utilizado para resolver el modelo multiobjetivo es el algoritmo NSGAll (NonDominated Sorting Genetic Algorithm-II), el cual hace parte de la familia de los algoritmos evolutivos multiobjetivo (MOEA), y que permite encontrar el conjunto de soluciones No dominadas (frontera Pareto) para el problema multiobjetivo de la optimización simultánea de los costos de transporte e inventario, del nivel de servicio y del número de trayectos requeridos.</p> <p>Esta hipótesis es demostrada con los resultados del modelo en el proceso de aplicación, los cuales son factibles con respecto a las tres funciones objetivo para el proceso de distribución de mercancías en un entorno de logística de ciudad.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Como conclusión final, esta tesis doctoral ha generado varios aportes que aumentan el conocimiento científico el área de la logística y la administración de la cadena de suministros, más específicamente para el estudio de la colaboración en procesos de distribución de mercancías en entornos de logística de ciudad, los cuales son:

- Se formuló un modelo de distribución de mercancías que abarca condiciones externas a las empresas, contemplando la colaboración entre múltiples clientes y múltiples proveedores y velando por disminuir el efecto negativo de dicho proceso de distribución en las ciudades, lo cual se logra formulando un modelo que balancea los costos para las empresas, el cumplimiento de los niveles de servicio de los clientes y el número de trayectos que se requieren para el abastecimiento de los mismos desde múltiples proveedores.
- Se desarrolló una propuesta innovadora de un algoritmo genético multiobjetivo, el cual presenta una representación de los individuos que permite asignar de manera simultánea las cantidades de reabastecimiento para los clientes y el diseño de las rutas para dicho fin.
- Se formuló un modelo de múltiples proveedores y múltiples clientes con las condiciones de distribución en ciudades, considerando ventanas de tiempo e inventario colaborativo, en un proceso de optimización multiobjetivo, lo cual no ha sido estudiado ni publicado previamente en la literatura científica especializada.

6.2 Futuras líneas de investigación

A partir de la investigación realizada en esta tesis doctoral y de los resultados obtenidos ha sido posible identificar nuevas líneas de investigación, las cuales son:

- Formular nuevos modelos matemáticos y conceptuales que permitan utilizar mecanismos y tipos de colaboración entre empresas e incluyendo la colaboración en otras funciones de la logística como el abastecimiento, almacenamiento y en el uso infraestructura compartida, entre otros. Estos modelos deben continuar contemplando la característica de incluir múltiples objetivos y expandir estos a otras variables relevantes en los procesos de distribución urbana de mercancías, como el impacto ambiental.
- Desarrollar propuestas de colaboración entre actores del proceso de distribución de mercancías, en los cuales se incluyan actores privados y públicos, a partir de lo cual se

pueda generar nuevas alternativas para la distribución de mercancías en ciudades, como por ejemplo intensificando la comunicación entre los vehículos y las condiciones de tráfico de las vías, establecer carriles y/o vías exclusivas para el transporte de mercancías y combinar el transporte de carretera con el transporte de personas.

- Estudiar la aplicación de los procesos de colaboración para la distribución de productos de alto riesgo o bajo condiciones especiales de transporte, en los cuales es necesario desarrollar operaciones especializadas para la distribución de mercancías, como es el caso de productos de alto impacto biológico, químico o físico, o en la procesos de distribución en respuesta a desastres u algún otro evento inesperado (Resiliencia en colaboración).

6.3 Productos académicos derivados de la investigación doctoral.

Durante el desarrollo de la presente tesis doctoral, se han generado varios resultados académicos con el objetivo de divulgar los resultados parciales de la investigación. Los productos académicos derivados de la presente tesis doctoral publicados hasta la fecha son:

Artículos Publicados

- Arango-Serna, M.D; Adarme, W. y Zapata Cortes, J.A. (2013). Inventarios colaborativos en la optimización de la cadena de suministros. *Dyna*, Vol. 80 Nro. 181, pp.71 – 80. Revista con índice SJR: 0.23 y categoría A1 Colciencias.
- Arango, M.D; Zapata J.A. y Gutiérrez, D. (2015) Modeling The Inventory Routing Problem (IRP) With Multiple Depots With Genetic Algorithms. *IEEE Latin American Transactions*. v.13, Issue 12, pp.3959 – 3965. Revista con índice SJR 0.326 y categoría A2 Colciencias.
- Arango-Serna, M.D. Andrés-Romano, C. y Zapata-Cortés, J.A. (2016). Collaborative goods distribution using the IRP model. *DYNA*, Vol. 83, Nro. 196, pp. 204-2012. Revista con índice SJR: 0.23 y categoría A1 Colciencias.

Artículo en evaluación

- Arango, M.D. y Zapata J.A. Multiobjective Model For The Simultaneous Optimization Of Transportation Costs, *Inventory Costs And Service Level In Goods Distribution*, enviado a la revista IEEE Latin American Transactions, en el mes de febrero de 2016. Revista con índice SJR 0.326 y categoría A2 Colciencias.

Ponencia

- Arango, M.D., Zapata, J.A and Andres, C. (2015). Metaheuristics for goods distribution. *Proceedings of 2015 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, IEEE Publications. pp.99 – 107, 2015. DOI. 10.1109/IESM.2015.7380143. Publicado en IEEE Xplore Digital Library.

Bibliografía

- Abdelmaguid, T. F. y Dessouky, M. M. (2006). A genetic algorithm approach to the integrated inventory-distribution problema. *International Journal of Production Research*, vol. 44, no. 21, pp. 4445–4464, 2006.
- Adarme, W. (2012). Desarrollo metodológico para la optimización de la cadena de suministro esbelta con m proveedores y n demandantes bajo condiciones de incertidumbre. Caso aplicado a empresas navieras colombianas. Tesis de Doctorado en Ingeniería-Industria y Organizaciones. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.
- Adetiloye, T. O. (2012). Collaboration Planning of Stakeholders for Sustainable City Logistics Operations. Master Thesis. Concordia University. Montreal, Quebec, Canada.
- Ahmadi, A y Barna, L. (2015). A Process Modelling-Life Cycle Assessment-MultiObjective Optimization tool for the eco-design of conventional treatment processes of potable wáter. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier, 2015, 100, pp.116-125
- Alcaldia de Medellin. (2015). Perfil Sociodemográfico 2005 - 2015 Total Medellín. <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/wpccontent/Sites/Subportal%20del%20Ciudadano/Planeación%20Municipal/Secciones/Indicadores%20y%20Estad%C3%ADsticas/Documentos/Proyecciones%20de%20población%202005%20-%202015/Perfil%20Demografico%202005-2015%20Total%20Medellin.pdf>
- Allal-Chérif, Oihab y Maira, Salvator. (2011) Collaboration as an anti-crisis solution: the role of the procurement function. *International Journal of Physical Distribution y Logistics Management*, Vol. 41 N. 9. pp. 860 - 877

- Allred, C. R., Fawcett, S. E., Wallin, C., y Magnan, G. M. (2011). A dynamic collaboration capability as a source of competitive advantage. *Decision Sciences*, 42(1), 129–161.
- Amer y Luong 2012. Order Fulfillment: A Key to Supply Chain Integration. En H. K. Chan et al. (eds.), *Decision-Making for Supply Chain Integration*, 189 *Decision Engineering I*, DOI: 10.1007/978-1-4471-4033-7_10, Ó Springer-Verlag London 2012
- Anand, N. y Yang, M. y, Van Duin, J.H.R. y Tavasszy, L. (2012) GenCLON: An ontology for city logistics. *Expert Systems with Applications* 39 (2012) 11944–11960
- Anderson, S. y Allen, J. y Browne, M. (2005). Urban logistics—how can it meet policy makers sustainability objectives?. *Journal of Transport Geography* 13 (2005) 71–81
- Andersson, H; Hoff, A; Christiansen, M; Hasle G. y Løkketangen, A. (2010) Industrial aspects y literature survey: Combined inventory management y routing. *Comput. Oper. Res.* 37, pp. 1515–1536.
- ANDI 2015. Boletín Retail. Disponible en: <http://www.andi.com.co/cpcd/Boletin%202014/Boletin%20Retail%20No%2015.pdf> Última visita: Marzo 2016.
- Andres, Beatiz y poler, Raul. (2011). Análisis de los Procesos Colaborativos en Redes de Empresas No-Jerárquicas. 5th International Conference on Industrial Engineering y Industrial Management. XV Congreso de Ingeniería de Organización. Cartagena, 7 a 9 de Septiembre de 2011. Pp. 636-645
- Andriolo, Alessandro; Battini, Daria, Persona, Alessandro y Sgarbossa, Fabio. (2015). Haulage sharing approach to achieve sustainability in material purchasing: New method y numerical applications. *Int. J. Production Economics* 164 (2015) 308–318
- Androutsopoulos, Konstantinos N. y Zografos, Konstantinos G. (2010). Solving the bicriterion routing y scheduling problem for hazardous materials distribution. *Transportation Research Part C* 18 (2010) 713–726
- Angeles, R., y Nath, R. (2001). Partner congruence in electronic data interchange (EDI) enabled relationships. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 109–127.
- Anily, S. y Federgruen, A. (1990). One warehouse multiple retailer systems with vehicle routing costs. *Management Science* 36. pp 92-114.
- Antún, J. P. (2013). Distribución Urbana de Mercancías: Estrategias con Centros Logísticos. Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente. Nota técnica # IDB-TN-167.

- Arango-Serna, M.D; Adarme, W. y Zapata Cortes, J.A. (2013). Inventarios colaborativos en la optimización de la cadena de suministros. *Dyna*, Vol. 80 Nro. 181, pp.71 – 80.
- Arango, M. D; Adarme, W. y Zapata, J. A. (2010b). Distribución de commodities, usando medios alternativos de transporte. Caso Colombia pymes panificadoras”. *Revista DYNA*. Vol 77 septiembre 2010. Pp. 222-233.
- Arango, M. D., Zapata, J. A. y Adarme, W., (2011b). “Aplicación del modelo de inventario manejado por el vendedor en una empresa del sector alimentario colombiano,” *Revista EIA*, vol. 15, pp. 21-32.
- Arango, M.D y Adarme, W y Zapata, J.A. (2011) La movilidad de carga en ciudades metrópolis – logística de ciudades. *Apotema S.A.S*. ISBN: 978-958-44-9517-4
- Arango, M.D. Zapata J.A. and Gutierrez, D. (2015b) “Modeling The Inventory Routing Problem (IRP) With Multiple Depots With Genetic Algorithms”. *IEEE Latin American Transactions*.v.13 ..12, pp.3959 – 3965, 2015.
- Arango, M.D., Serna, C. A., Alvaréz, K.C. Zapata, J.A. y Alvarez, A.F. (2014). Vehicle routing to multiple warehouses using a memetic algorithm. *Procedia - Social y Behavioral Sciences*. Volume 160, 19 December 2014, Pages 587–596
- Arango, M.D., Zapata, J. A. y Andres, C. (2015) “Metaheuristics for goods distribution”. *Proceedings of 2015 International Conference on Industrial Engineering y Systems Management (IESM)*, IEEE Publications. pp.99 – 107, 2015. DOI. 10.1109/IESM.2015.7380143
- Arango-Serna, M.D. Andrés-Romano, C. y Zapata-Cortés, J.A. (2016). Collaborative goods distribution using the IRP model. *DYNA* Vo. 83 (196), pp. 204-2012.
- Archetti C, Bertazzi L, Laporte G, Speranza MG. (2007). A branch-and-cut algorithm for a vendor-managed inventory-routing problem. *Transportation Science*;41(3):382–91.
- Archetti, Claudia; Bianchessi, Nicola; Irnich, Stefan y Speranza, M. Grazia (2014). Formulations for an inventory routing problem. *Intl. Trans. in Op. Res.* 21. Pp.
- Archetti, Claudia; Doerner, Karl F. y Tricoire, Fabien. (2013). A heuristic algorithm for the free newspaper delivery problem. *European Journal of Operational Research* 230 (2013) 245–257
- Arora, V; Chan, F.T.S. y Tiwari, M.K. (2020). An integrated approach for logistic y vendor managed inventory in supply chain. *Expert Systems with Applications*. Vol. 37.

- Aschauer, Gerald J. y Starkl, Friedrich (2010). Time4trucks - cooperative time regulation of road freight transportation in urban areas for reducing bottlenecks. *Procedia Social y Behavioral Sciences* 2 (2010) 6242–6250
- Ashurst (2014). Co-operation agreements between competitors. www.ashurst.com. © Ashurst LLP 2014 Ref: 9095735 March 2014
- Audy, Jean-François, Nadia; D'Amours, Sophie; Rönnqvist, Mikael (2010). A Framework for an Efficient Implementation of Logistics Collaborations. CIRRELT-2010-24.
- Azuma, Regina M. Coelho, Guilherme P. y Von Zuben, Fernando J. (2011) Evolutionary Multi-Objective Optimization for the Vendor-Managed Inventory Routing Problem. In *EEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*, pages 1457–1464.
- Bahinipati, B.K. y Deshmukh, S.G. Vertical collaboration in the semiconductor industry: A decision framework for supply chain relationships. *Computers y Industrial Engineering* 62 (2012) 504–526
- Ballou, Ronald H, “Logística, administración de la Cadena de Suministros”, México, Prentice Hall, Quinta Edición, 2004.
- Banco de la republica. (2016). Índice de precios al consumidor (IPC). Disponible en: <http://www.banrep.gov.co/es/ipc> Última visita: Marzo 2016.
- Barcos, L y Rodríguez, V. y Álvarez, M.J. y Robusté, F. (2010). Routing design for less-than-truckload motor carriers using Ant Colony Optimization. *Transportation Research Part E* 46. Pp. 367–383
- Barrat M. y Oliveira, A. (2001). Exploring the experiences of collaborative planning initiatives. *International Journal of Physical Distribution y Logistics Management*, vol. 31, no. 4, pp. 66–89.
- Barrat, M. (2004). Understanding the meaning of collaboration in the supply chain. *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 9, no. 1, pp. 30–42.
- Bautista- Santos, H; Martínez-Flores, J. L; Fernández-Lambert, G; Bernabé-Loranca, M. B; Sánchez-Galván, F. y Sablón-Cossío, N. Integration model of collaborative supply chain DYNÁ 82 (193), pp. 145-154. October, 2015.
- Behrends, Sönke; Lindholm, , Maria y Woxenius, Johan (2008) The Impact of Urban Freight Transport: A Definition of Sustainability from an Actor's Perspective, *Transportation Planning y Technology*, 31:6, 693-713.

- Bell, W. y Dalberto, L.M. y Fisher, M.L. y Greenfield, A.J. y laikumar, R. y Kedia, P. y Mack, R.G. y Plutzman, P.J. (1983). Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing y scheduling optimizer. *Interfaces* 13. pp 14-23.
- Bendul, Julia. (2014). *Integration of Combined Transport into Supply Chain Concepts Simulation-based Potential Analysis y Practical Guidance*. Springer Gabler . Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Benjelloun, A., Crainic, T. G., y Bigras, Y. (2010). Towards a taxonomy of City Logistics projects. *Procedia Social y Behavioral Sciences* 2 (2010) 6217–6228
- Bertazzi, Luca y Esperanza, M. G. (2013). Inventory routing problems with multiple customers. *Speranza .EURO J Transp Logist* 2:255–275
- BESTUFS II. (2007). Best Practice Update 2007. Intelligent Transport Systems (ITS). SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME FOR RESEARCH y TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT: Integrating y Strengthening the European Research Area (2002-2006), Sustainable Surface Transport. Disponible en: http://www.bestufs.net/download/BESTUFS_II/key_issuesII/BPU-2007-II ITS.pdf
- BESTUFS II. (2008a). Best Practice Update (2008): E-Commerce y urban freight distribution (home shopping). SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME FOR RESEARCH y TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT: Integrating y Strengthening the European Research Area (2002-2006), Sustainable Surface Transport. Disponible en: http://www.bestufs.net/bestufs2_bp_handbook.html Última visita, 12 junio de 2015.
- BESTUFS II. (2008b). Best Practice Update (2008): Public Private Partnerships (PPP) in urban freight transport. SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME FOR RESEARCH y TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT: Integrating y Strengthening the European Research Area (2002-2006), Sustainable Surface Transport. Disponible en: http://www.bestufs.net/bestufs2_bp_handbook.html Última visita, 12 junio de 2015.
- Bhatnagar, R y Chandra, P. y Goyal, S. (1992). Models for multi-plant coordination *DecisionCraft*, Paper 269. Disponible en: <http://www.decisioncraft.com> Última visita: 28 de septiembre de 2013
- Bindi, F. (2010). *Advanced Models y Tools for Inbound y Outbound Logistics in Supply Chain*. “Logistica Inbound ed Outbound nei sistemi produttivi”. Tesis de Doctorado. Università di

- bologna. Dipartimento di tecnica e gestione dei sistemi industriali scuola di dottorato di ricerca in ingegneria industriale mecatronica e sistemi industriali ciclo xxii
- Björklund, Maria y Gustafsson, Sara. (2015). Toward sustainability with the coordinated freight distribution of municipal goods. *Journal of Cleaner Production* 98 (2015). pp 194-204 .
- Bouhouras, Eustace y Basbas, Socrates. (2012). Urban road freight transport systems: questions y answers. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 48 (2012) 2501 – 2512
- Bowersox, Closs, y Cooper. (2002). *Supply Chain Logistics Management*, First Edition. New York City: McGraw-Hill Companies, Inc. 2002, pp. 1-400
- Bozzo, Riccardo; Conca, Andrea y Marangon, Flavio. (2014). Decision support system for city logistics: literature review, y guidelines for an ex-ante model. *Transportation Research Procedia* 3 (2014) 518 – 527
- Brown Jay R. y Guiffrida, Alfred L. (2014) Carbon emissions comparison of last mile delivery versus customer pickup. *International Journal of Logistics Research y Applications: A Leading Journal of Supply Chain Management*. Volume 17, Issue 6.
- Browne, M., Allena, J., Nemotob, T., Patierc, D. Visser, J. (2012). Reducing social y environmental impacts of urban freight transport: A review of some major cities. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 39. pp. 19 – 33
- Browne, Michael y Gomez, Mireia. (2011), "The impact on urban distribution operations of upstream supply chain constraints", *International Journal of Physical Distribution y Logistics Management*, Vol. 41 Iss 9 pp. 896 - 912
- Burns, L.D. y Hall, R.W. y Blumenfeld, D.E. y Daganzo, C.F. (1985). Distribution strategies that minimize transportation y inventory costs. *Operations Research* 31. pp 469-490.
- Camarinha-Matos, Luis M; Afsarmanesh, Hamideh; Galeano, Nathalie y Molina, Arturo. (2009). Collaborative networked organizations – Concepts y practice in manufacturing enterprises. *Computers y Industrial Engineering* 57 (2009) 46–60
- Camarinha-Matos, Luis M. (2009). Collaborative networked organizations: Status y trends in manufacturing. *Annual Reviews in Control* 33 (2009) 199–208
- Campbell y Savelsbergh: A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem *Transportation Science* 38(4), pp. 488–502, © 2004 INFORMS

- Cao, Mei y Zhang, Qingyu. (2013). Supply Chain Collaboration. Springer-Verlag London 2013 . ISBN 978-1-4471-4591-2
- Cao, Mei y Zhang, Qingyu. (2011) Supply chain collaboration: Impact on collaborative advantage y firm performance. Journal of Operations Management 29. Pp. 163–180
- Capó Vicedo, Josep ; Lario, Francisco C. y Ortiz Bas, Ángel. (2003). Integración empresarial y redes interorganizaciones en la gestión de la cadena de suministro. Aplicación al sector de la construcción. V Congreso de Ingeniería de Organización Valladolid-Burgos, 4-5 Septiembre 2003.
- Caputo, M., Mininno, V., 1996, Internal, Vertical y Horizontal Logistics integration in Italian Grocery Distribution, International Journal of Physical Distribution y Logistics Management, 26/9: 64–89.
- Cassivi, L. (2006). Collaboration planning in a supply chain. Supply Chain Management: An International Journal, vol. 11, no. 3, pp. 249–258.
- Chan, F.T.S. y Prakash, A. (2012) Inventory management in a lateral collaborative manufacturing supply chain: a simulation study. International Journal of production Research, vol. 50, no. 16, pp. 4670–4685.
- Chandra, P. (1993). A dynamic distribution model with warehouse y customer replenishment requirements, Journal of the Operational Research Society, Vol. 44, No. 7. pp. 681-692,.
- Chandra, P. y Fisher, M. (1994). Coordination of production y distribution planning. European Journal of Operational Research Volume 72, Issue 3. pp 503–517
- Chang, Tsung-Sheng y Yen, Hui-Mei. (2012). City-courier routing y scheduling problems. European Journal of Operational Research 223 (2012) 489–498
- Cho, D. W., Lee, Y. H., Lee T. Y. y Gen, M. (2014). “An adaptive genetic algorithm for the time dependent inventory routing problema”. Journal of Intelligent Manufacturing. Vol. 25, pp 1025–1042, 2014.
- Chopra, y Meindl S. (2008) Administración de la cadena de Suministro, Tercera Edición, Prentice Hall, Mexico.
- CIVITAS (2010). Cluster Report 4: Logistics y Goods Distribution. Union Europea. Disponible en: http://www.civitas.eu/sites/default/files/civitas_guard_final_cluster_report_nr_4_logistics_and_goods_distribution.pdf Última visita, 12 junio de 2015.

- CIVITAS (2013). Transport Telematics. Disponible en <http://www.civitas.eu/TG/transport-telematics> última visita: julio de 2015.
- CMA (2015). Informe de precios: Mayorista y volúmenes. Primer trimestre. Disponible en: <http://www.lamayorista.com.co> Última visita: Marzo 2016.
- Coelho, L. C. y Laporte, G. (2013). The exact solution of several classes of inventory-routing problems. *Computers y Operations Research* 40. Pp. 558–565
- Coelho, Leandro C; Cordeau, Jean-François; Laporte, Gilbert. (2012) Thirty Years of Inventory-Routing. September 2012 CIRRELT-2012-52
- Cohen, M.A. y Lee, H.L. (1988). Strategic analysis of integrated production distribution systems: Models y methods. *Operations Research* 36, 216-228.
- Comeaux, E.J. (2004). Joint optimization of process improvement investments for supplier-buyer cooperative commerce. M.sc. Thesis. Louisiana state university.
- Congreso de Colombia. (2009). LEY 1340 DE 2009. Disponible en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=36912> Última visita: Agosto de 2009
- Coronado, A; Lyons, A; Michaelides, Z. y Kehoe, D. (2006). Automotive supply chain models y technologies: a review of some latest developments. *Journal of Enterprise Information Management*, vol. 19, no. 5, pp. 551–562.
- Correa, C.A., Bolaños, R.A. y Molina, A. (2008). Algoritmo multiobjetivo nsga-ii aplicado al problema de la mochila”. *Scientia et Technica*, vol. Xiv, núm. 39, septiembre, pp. 206-211, 2008.
- Crainic TG, Errico F, Rei W, Ricciardi N (2012) Integrating c2e y c2c traffic into city logistics planning. *Procedia-Social Behav Sci* 39:47–60
- Crainic, T. G. (2008). City Logistics. CIRRELT – 2008-25.
- Crujssen, F. (2006), Horizontal Cooperation in Transport y Logistics, PhD. Thesis, Tilburg University, Tilburg.
- D’Amours, S. et al., 2006. Agent-Based Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. In *Information Technology For Balanced Manufacturing Systems*. Boston, MA: Springer US, pp. 17–26.
- Dablanc, Laetitia (2007). Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A* 41. pp. 280–285

- DANE (2016). Boletín Técnico: Índice de Precios al Consumidor Marzo de 2016. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. Cód.: DIE-020-PD-01-r7_v2, fecha: 18/12/2014. Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/indices-de-precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc>
- Danese, P. (2006). The extended VMI for coordinating the whole supply chain network. *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 17, no. 7, pp. 888–907.
- Danielis, Romeo., Rotaris, Lucia. y Marcucci, Edoardo. (2010). Urban Freight Policies y distribution Channels. *European Transport\Transporti Europei*. N. 46. Pp: 114-146.
- De la Fuente i Oliva, Samuel. (2012). La influencia de la forma urbana en la movilidad: un análisis empírico para las áreas urbanas de Madrid y Barcelona. Tesis doctoral. Departament d'economia aplicada Facultat d'Economia i Empresa Universitat Autònoma de Barcelona
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. y Meyarivan, T. (2002) "A Fast y Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II", *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 6, no. 2, april, 2002
- Deflorio, F., González-Feliu, J., Perboli, G., Tadei, R. (2012). The Influence of Time Windows on the Costs of Urban Freight Distribution Services in City Logistics Applications. *EJTIR* 12(3), pp. 256-274
- Derroiche, R; Neubert, G. y Bouras, A. (2008). Supply chain management: a framework to characterize the collaborative strategies. *International journal of computer integrated manufacturing*, vol. 21, no. 4, pp. 426–439.
- Díaz R., Avelino O. (2011) Transformación social del hábitat renovación urbana: el barrio entre la acción social y la acción de gobierno el caso del plan parcial de San Lorenzo, en Medellín. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia. - See more at: <http://www.bdigital.unal.edu.co/7005/#sthash.6FaQXulg.dpuf>
- Díaz-Batista, J. y Pérez-Armador, D., "Optimización de los niveles de inventario en una cadena de suministro," *Ingeniería Industrial*, vol. 33, (2), pp. 126-132, 2012.
- DNP (2015). Transporte: Congestion y movilidad. En. sistemas de ciudades. Disponible en <https://www.dnp.gov.co/programas/vivienda-agua-y-desarrollo-urbano/desarrollo-urbano/Paginas/sistema-de-ciudades---libro.aspx>
- Dominguez, A. (2013). Modelización del comportamiento de los comerciantes ante nuevas políticas de reparto urbano de mercancías. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria.

- Dong, Y., y Xu, K. (2002). A Supply Chain Model of Vendor Managed Inventory. *Transportation Research Part E*, 38 (2), 75-95.
- Dongjie, Shen (2009). Collaborative Management of Inventory y Replenishment Strategies in Perishable Products Supply Chains. PhD. Thesis. CITY UNIVERSITY OF HONG KONG.
- Dror, M. y Ball, M. (1987). Inventory/routing: Reduction from an annual to a short period. *Naval Research Logistics Quarterly* 34. pp 891-905.
- Du, X. F; Leung, S. C. H; Zhang, J. L. y Lai, K. K. (2009). Procurement of a Agricultural products using the CPFR approach. *Supply Chain Management: An International Journal*, vol. 14, no. 253–258.
- Dudek, Gregor. (2009). Supply Chain Management y Collaborative Planning. *Collaborative Planning in Supply Chains*. Springer Berlin Heidelberg pp 5-24. ISBN. 978-3-540-92176-9
- Ehmke, Jan Fabian. (2012). Integration of Information y Optimization Models for Routing in City Logistics. *International Series in Operations Research y Management Science*. Springer, New York
- Ehmke, Jan Fabian. (2012). Integration of Information y Optimization Models for Routing in City Logistics. *International Series in Operations Research y Management Science*. Springer, New York
- Esposito, E., y Passaro, R. (2009). The evolution of supply chain relationships: An interpretative framework based on the Italian inter-industry experience. *Journal of Purchasing y Supply Management*, 15(2), 114–126.
- Estrada, Miquel Àngel. (2007) Análisis de estrategias eficientes en la logística de distribución de paquetería. Tesis Doctoral. Programa de Doctorado de Ingeniería Civil E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya
- Estrada, M. y Roca-Riu, M. y Badia, H. y Robusté, F. y Daganzo, CF. (2011). Design y implementation of efficient transit networks: Procedure, case study y validity test. *Transportation Research Part A* 45. Pp. 935–950.
- EUROPEAN COMMISSION (2013). Mobilising Intelligent Transport Systems for EU cities. Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic y Social Committee y The Committee Of The Regions. Disponible en: [http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/doc/ump/swd\(2013\)527-communication.pdf](http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/doc/ump/swd(2013)527-communication.pdf) Última visita, 12 junio de 2015.

- EUROPEAN COMMISSION (2013). Mobilising Intelligent Transport Systems for EU cities. Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic y Social Committee y The Committee Of The Regions. Disponible en: [http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/doc/ump/swd\(2013\)527-communication.pdf](http://ec.europa.eu/transport/themes/urban/doc/ump/swd(2013)527-communication.pdf) Última visita, 12 junio de 2015.
- Fawcett, S. E., Wallin, C., Allred, C., Fawcett, A., y Magnan, G. M. (2011). Information technology as an enabler of supply chain collaboration: A dynamic-capabilities perspective. *Journal of Supply Chain Management*, 47(1), 38–59.
- Fawcett, S., Waller, M. y Fawcett, A., “Elaborating a dynamic systems theory to understand collaborative inventory successes y failures,” *The International Journal of Logistics Management*, vol. 21(3), pp. 510-537, 2010.
- Fawcett, S.E., Magnan, G.M., 2004. Ten guiding principles for high-impact SCM. *Business Horizon* 47 (5), 67–74.
- Fernandes da silva, Teodomiro. (2005) La cooperación interempresarial: nuevas estrategias empresariales para pequeñas empresas en el proceso de desarrollo local. PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural. Vol. 3 No 1 págs. 125-141.
- Fernandez-Barcelo, Ivan y, Campos-Cacheda, J. Magin. (2012). Estimate of social y environmental costs for the urban distribution of goods. Practical case for the city of Barcelona *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 39. pp818 – 830
- Figueira, José; Greco, Salvatore y Ehr Gott, Matthias. (2005). Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. Springer Science + Business Media, Inc. Boston, USA.
- Fonseca CM, Fleming PJ. An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. *Evolutionary Computing* 1995; 3(1): pp. 1–16.
- Ford Motor Company. (2016). Ford TRANSIT. Disponible en: <http://es.ford.com/trucks/transitvanwagon/specifications/> Última visita: abril de 2016.
- Frans Cruijssen, Martine Cools y Wout Dullaert. (2007). Horizontal cooperation in logistics: Opportunities y impediments. *Transportation Research Part E* 43 (2007) 129–142.
- Frisk, M; Göthe-Lundgren, M; Jörnsten, K; Rönnqvist, M. (2010). Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research* 205 (2010) 448–458

- Fu, Y; Piplani, R; De souza, R. y Wu, J. (2000). Multi-Agent enabled modeling y simulation towards collaborative inventory management in supply chain. Proceeding of the 2000 winter simulation conference, pp. 1763–1771.
- Galeano, E. y Montoya, V. (2008). Optimización multiobjetivo de la operación en sistemas automatizados de distribución de energía eléctrica. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Eléctrico, Universidad Tecnológica De Pereira. Pereira, Colombia.
- Goffin, K., Lemke, F., y Szwejcowski, M. (2006). An exploratory study of close supplier-manufacturer relationships. *Journal of Operations Management*, 24(2), 189–209.
- Golicic, S. L; Foggin, J. H. y Mentzer, J. T. (2003) Relationship magnitude y its role in inter-organizational relationship structure,” *Journal of Business Logistics*, vol. 24, no. 1, pp. 57–75.
- González-Álvarez, David L. (2013). Metaheurísticas, Optimización Multiobjetivo y Paralelismo para Descubrir Motifs en Secuencias de AND. Tesis de Doctorado en el Departamento de Tecnología de los Computadores y de las Comunicaciones. Universidad de Extremadura. Disponible en: última visita: Agosto de 2016
- González-Feliu, J. (2012). Costs y benefits of logistics pooling for urban freight distribution: scenario simulation y assessment for strategic decision support Jesus González-Feliu. Manuscrit auteur, publié dans “Seminario CREI, Rome : Italie (2011).
- González-Feliu, J. y Morana, J. (2010). Are City Logistics Solutions Sustainable? The Cityporto case, TeMA. *Journal of Land Use, Mobility y Environment* Vol. 3, n° 2, pp. 55-64.
- González-Feliu, Jesus y Morana, Joelle. (2014) Assessing urban logistics pooling sustainability via a hierarchic dashboard from a group decision perspective. 2014. <halshs-01053887>
- González-Feliu, Jesus y Salanova, Josep-Maria. (2012). Defining y evaluating collaborative urban freight transportation systems. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 39 (2012) 172 – 183
- González-Feliu, Jesus; Morana, Joelle; Salanova, Josep-Maria y Ma, Tai-Yu. (2013). Design y scenario assessment for collaborative logistics y freight transport systems. *International Journal of Transport Economics*, 2013, pp.207-240
- González-Feliu, Jesus; Peris-Pla, Carlos; y Rakotonarivo, Dina. (2010). Simulation y optimization methods for logistics pooling in the outbound supply chain. Third International Conference

- on Value Chain Sustainability. "Towards a Sustainable Development y Corporate Social Responsibility Strategies in the 21st Century Global Market, Nov 2010, Spain. pp.394-401, 2010.
- González, David. L. (2013). Metaheurísticas, Optimización Multiobjetivo y Paralelismo para Descubrir Motifs en Secuencias de AND. TESIS DOCTORAL. Departamento: Tecnología de los Computadores y de las Comunicaciones. Universidad de Extremadura. España.
- Google (2016). API de Google Maps. Disponible en: <https://developers.google.com/maps/>
Última visita: Abril de 2016.
- Goyal, S., y Deshmukh, S. (1992). Integrated procurement-distribution systems: a review. *European Journal of Operational Research*, 62, 1-10.
- Goyal, S., y Yash, G. (1989). Integrated inventory models: the buyer-vendor coordination. *European Journal of Operational Research*, 41(3), 261-269.
- Goyal, S.K. y Gupta, Y.P. (1989). Integrated inventory y models: The buyer-vendor coordination. *European Journal of Operational Research* 41. pp 261-269.
- Gruber, Johannes., Kihm, Alexander y Lenz , Barbara (2014).A new vehicle for urban freight? An ex-ante evaluation of electric cargo bikes in courier services. *Research in Transportation Business y Management* 11 (2014) 53–62.
- Hageback, C. y A. Segerstedt (2004). The need for co-distribution in rural areas – a study of Pajala in Sweden. *International Journal of Production Economics*, 89(2), pp 153-163.
- Haghshenas, Hossein y Vaziri, Manouchehr. (2012). Urban sustainable transportation indicators for global comparison. *Ecological Indicators*, Volume 15, Issue 1, April 2012, Pages p.p. 115-121.
- Hajdul, Marcin. (2014). Virtual co-opetition in transport - T-Scale platform case study. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 111 (2014) 761 – 769
- Hall, David C. y Saygin, Can. (2012). Impact of information sharing on supply chain performance. *Int J Adv Manuf Technol* (2012) 58:397–409 DOI 10.1007/s00170-011-3389-0
- Hendriks, M.P.M. (2009). Multi-Step Optimization of Logistics Networks Strategic, Tactical, y Operational Decisions. Eindhoven University of Technology Library. ISBN 978-90-386-1572-1.

- Hernández, Salvador; Peeta, Srinivas y Kalafatas, George. (2011). A less-than-truckload carrier collaboration planning problem under dynamic capacities. *Transportation Research Part E* 47 (2011) 933–946
- Holweg, M; Disney, S; Holmström, J. y Smaros, J. (2005). Supply Chain Collaboration: Making sense of the strategy continuum. *European Management Journal*, vol. 23, no. 2, pp. 170–181.
- Hoyt, J., y Huq, F. (2000). From arms-length to collaborative relationships in the supply chain: An evolutionary process. *International Journal of Physical Distribution y Logistics Management*, 30 (9), 750–764.
- Hsieh C.-L. y Laio, S.-H. (2011). A multiobjective Evolutionary Approach for a integrated Location-Inventory problem in Vendor Managed Systems. *Journal Expert Systems with Applications: An International Journal*, vol. 38, no. 6, pp. 6768–6776.
- Hugos, M. (2003). *Essentials of Supply Chain Management*. New Jersey, USA: John Wiley y Sons, Inc. 2003, pp. 1-88.
- Iankoulova, Iliana (2012). BUSINESS INTELLIGENCE FOR HORIZONTAL COOPERATION: MEASURING THE PERFORMANCE OF A TRANSPORTATION NETWORK SHARING COOPERATION BETWEEN LOGISTICS COMPANIES. Master Thesis. Master of Science in Business Information Technology School of Management y Governance University of Twente, Enschede, The Netherlands
- Ibeas, A., Moura, J. L., Nuzzolo, A. y Antonio Comi, A. (2012). Urban freight transport demand: transferability of survey results analysis y models. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 54. pp. 1068 – 1079
- Jaber, M., y S.K., G. (2008). Coordinating a three-level supply chain with multiple suppliers, a vendor y multiple buyers. *Int J. Production Economics*, 116 (1), 95–103.
- Jarašūnienė, A. (2007). Research Into Intelligent Transport Systems (Its) Technologies y Efficiency. *TRANSPORT – 2007*, Vol. XXII, No 2, pp. 61–67
- Jeenanunta, Chawalit; Ueki, Yasushi y Visanvetchakij, Thunyalak. (2013). Supply chain collaboration y firm performance in Thai automotive y electronics industries. *Glob Bus Perspect* (2013) 1:418–432
- Kaibara de Almeida, Marly Mizue y Silva Marins, Fernando Augusto y Pedro Salgado, Andréia Maria y Almada Santos, Fernando César y da Silva, Sérgio Luis. (2015). Mitigation of

- the bullwhip effect considering trust and collaboration in supply chain management: a literature review. *Int J Adv Manuf Technol* (2015) 77:495–513
- Kang, Jae-Hun y Kim, Yeong-Dae (2010). Coordination of inventory y transportation managements in a two-level supply chain. *Int. J. Production Economics* 123. Pp 137–145 .
- Kelle, P y Al-khateeb, F y Miller, P.A (2003) Partnership y negotiation support by joint optimal ordering/setup policies for JIT. *Int. J. Production Economics* 81–82. pp 431–441.
- Kelle, P. y Miller, P.A. y. Akbulutç, A.Y. (2007). Coordinating ordering/shipment policy for buyer y supplier: Numerical y empirical analysis of influencing factors. *Int. J. Production Economics* 108. pp 100–110.
- Kijewska, Kinga y Johansen, Bjørn Gjerde. (2014). Comparative analysis of activities for more environmental friendly urban freight transport systems in Norway y Poland. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 151 (2014) 142 – 157
- Kim, B., Leung, J., Park, K. T., Zhang, G., y Lee, S. (2002). Configuring a Manufacturing Firm's Supply Network with Multiple Suppliers. *IIE Transactions*, 34(8), 663-677.
- Kim, K. K., Umanath, N. S., y Kim, B. H. (2005). An assessment of electronic information transfer in B2B supply-channel relationships. *Journal of Management Information Systems*, 22(3), 293–320.
- Klastorin, T. D., Moinzadeh, K., y Son, J. (2002). Coordinating Orders in Supply Chains Through Price Discounts. . *IIE Transactions*, 34(8), 679-689.
- Köppen M. y Yoshida, K. (2007)“Substitute Distance Assignments in NSGA-II for Handling Many-Objective Optimization Problems”. In S. Obayashi et al. (Eds.): EMO 2007, LNCS 4403, pp. 727–741, 2007. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Krajewska, M. A; Kopfer, H; Laporte, G; Ropke, S. y Zaccour, G. (2008). Horizontal Cooperation among Freight Carriers: Request Allocation y Profit Sharing. *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 59, No. 11 (Nov., 2008), pp. 1483- 1491
- Kurasova, Olga., Petkus, Tomas and Filatovas, Ernestas. (2013). Visualization of Pareto Front Points when Solving Multi-objective Optimization Problems. *Information Technology And Control*, Vol.42, No.4. pp: 353-361
- Kuse, Hirohito., Endo, Akira., y Iwao, Eiichiro. (2010). Logistics facility, road network y district planning: Establishing comprehensive planning for city logistics. *Procedia Social y Behavioral Sciences* 2 pp. 6251–6263

- Kwak, C., Choi, J. S., Kim, C. O. y Kwon, I.-H., "Situation reactive approach to Vendor Managed Inventory problem," *Expert Systems with Applications*, vol. 36 (5), pp. 9039-9045, 2009.
- Lambert, D., Emmelhainz, M., y Gardner, J. (1999). Building successful partnerships. *Journal of Business Logistics*, 20 (1), 165–181.
- Lambert, Douglas M; Knemeyer, Michael; Gardner, John T. (2004). Supply chain partnerships: model validation y implementation *journal of business logistics*, vol. 25, no. 2, 2004.
- Larsen, S. (2000). European logistics beyond 2000. *International Journal of Physical Distribution y Logistics Management*, 30 (6), 377–387.
- Larsen, T., Thorne, C., y Anderson, C. (2003). Supply chain collaboration theoretical perspective y empirical evidence. *International Journal of Physical Distribution y Logistics*, 33 (6), 531–549.
- Lee, H. (2004). The triple-A supply chain. *Harvard Business Review*, vol. 82, no. 10, pp. 102–113.
- Lee, H.L. y Whang, S. (2001). E-Business y supply chain integration. *Stanford Global Supply Chain Management Forum*, SGSCMF-W2-2001.
- Lehoux, N., Audy, J.-F., D'Amours, S., Rönnqvist, M., 2009b. Issues y experiences in logistics collaboration. In: Camarinha-Matos, L., Paraskakis, I., Afsarmanesh, H., (Eds.). IFIP, Springer, pp. 69-77.
- Leitner, R; Meizer, F; Prochazka, M. y Sihn, W. (2011). Structural concepts for horizontal cooperation to increase efficiency in logistics *CIRP Journal of Manufacturing Science y Technology* 4. Pp 332–337.
- Li, Ling; Zhang, Ling y Willamowska-Korsak, Ling. (2014). The effects of collaboration on build-to-order supply chains: with a comparison of BTO, MTO, y MTS. *Inf Technol Manag* (2014) 15:69–79
- Li, H. y Zhang Q., (2009) "Multiobjective Optimization Problems With Complicated Pareto Sets, MOEA/D y NSGA-II", *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 13, no. 2, april, 2009

- Li, X., y Wang, Q. (2007). Coordination mechanisms of supply chain systems. *European Journal of Operational Research*, 179, 1-16.
- Lin, Dung-Ying y Ng, Kuok Hou. (2012). The impact of collaborative backhaul routing on carbon reduction in the freight industry. *Transportation Research Part D* 17 (2012) 626–628
- Lindholm, Maria y Behrends, Sönke. (2012). Challenges in urban freight transport planning – a review in the Baltic Sea Region. *Journal of Transport Geography* 22 (2012) 129–136
- Lindholm, Maria. (2014). Successes y Failings of an Urban Freight Quality Partnership – The Story of the Gothenburg Local Freight Network. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 125 (2014) 125 – 135
- Liu, Y y He, K. y Liu, J. y Xu, X. (2008). Analysis of the Concept of Urban Rail Transit Based City Logistics System. *International Conference on Smart Manufacturing Application*. April. 9-11, 2008 in KINTEX, Gyeonggi-do, Korea
- López J., Antonio y Zapotecas M., S. y Coello C., C.A. (2009). An introduction to multiobjective optimization techniques. in Ajith Abraham, Lakhmi Jain y Robert Goldberg (editors), *Evolutionary Multiobjective Optimization: Theoretical Advances y Applications*, pp. 7--32, Springer-Verlag, London, 2005, ISBN 1-85233-787-7
- López, J., Zapotecas S. y Coello, C.A. (2009) “An introduction to multiobjective optimization techniques”. in Ajith Abraham, Lakhmi Jain y Robert Goldberg (editors), *Evolutionary Multiobjective Optimization: Theoretical Advances y Applications*, pp. 7--32, Springer-Verlag, London, 2009.
- Macharis, Cathy y Melo, Sandra. (2011). *City Distribution y Urban Freight Transport: Multiple Perspectives*. Nectar Series on Transportation y Communications Networks Research. Edward Elgar Publishing Limited.
- Macharis, Cathy., Milan, Lauriane y Verlinde, Sara (2014). A stakeholder-based multicriteria evaluation framework for city distribution. *Research in Transportation Business y Management* 11. pp75–84
- Magalhães, David José A. V. de. (2010). Urban freight transport in a metropolitan context: The Belo Horizonte city case study. *Procedia Social y Behavioral Sciences* 2. Pp. 6076–6086

- Maibach, M., Schreyer, C., Sutter, D., van Essen, H.P., Boon, B.H. y Smokers, R. (2007). A. Schrotten, C. Doll, B. Pawlowska, M. Bak. (2007). Handbook on estimation of external cost in the transport sector Internalisation Measures y Policies for All external Cost of Transport (IMPACT) Delft, CE, 2007
- Malhotra, A; Gosain, S. y El Sawy, O. A. (2005). Absorptive Capacity Configurations in Supply Chains: Gearing for Partner-Enabled Market Knowledge Creation,” MIS Quarterly, vol. 29, no. 1, pp. 145–187.
- Mancini, Simona., González-Feliu, Jesus. y Crainic, Teodor Gabriel. (2014). Planning y Optimization Methods for Advanced Urban Logistics Systems at Tactical Level. En Sustainable Urban Logistics: Concepts, Methods and Information Systems. EcoProduction. Environmental Issues in Logistics y Manufacturing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Pp 145 - 164
- Manthou, V; Vlachopoulou, M. y Folinas, D. (2004). Virtual e-chain (VeC) model for supply chain collaboration,” International Journal of production Economics, vol. 87, no. 3, pp. 241–250.
- Marler, R.T. y Arora, J.S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. Struct Multidisc Optim 26, 369–395 (2004)
- Marquès, G; Thierry, C; Lamothe, J. y Gourc, D. (2010). A review of Vendor Managed Inventory (VMI): from concept to processes,” Production Planning y Control: The Management of Operations, vol. 21, no. 6, pp. 547–561.
- Martínez fierro, Salustiano. (2001). Aproximación teórica a los acuerdos de cooperación empresarial. Tesis de doctorado. UNIVERSIDAD DE CÁDIZ. Cadiz. España
- Mayares, Inge; Ochelen, Sara y proost, stef. (1996). The marginal external costs for urban transport. Transport Research Development. Vol 1. N. 2. Pp 111-130.
- MDS Transmodal Limited (2012). DG MOVE European Commission: Study on Urban Freight Transport FINAL REPORT. MDS Transmodal Limited. Ref: 210041r4_final report_v7. Disponible en: http://www.civitas.eu/sites/default/files/2012_ec_study_on_urban_freight_transport_0.pdf Última visita, 12 junio de 2015.
- Melián-Batista, B., De Santiago, A., Bello, F. A. , Alvarez A. (2014). A bi-objective vehicle routing problem with time windows: A real case in Tenerife. Applied Soft Computing 17 (2014) 140–152

- Min, Soonhong; Roath, Anthony S. y Daugherty, Patricia J. (2005). Supply chain collaboration: what's happening?. *The International Journal of Logistics Management* Vol. 16 No. 2, 2005 pp. 237-256
- Mínguez Fuentes, Raul (Sf). Cooperación para la internacionalización como estrategia de expansión exterior de la pyme. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. – España. Disponible en <http://www.minetur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/375/113.pdf> Última visita: septiembre de 2015.
- Moin, N.H; Salhi, S. y Aziz, N.A.B. (2011). An efficient hybrid genetic algorithm for the multi-product multi-period inventory routing problem. *Int. J. Production Economics* 133 (2011) 334–343.
- Montoya R., Luz Alexandra; Montoya R., Ivan Alonso y Castellanos D., Oscar Fernando. (200). De la noción de competitividad a las ventajas de la integración empresarial. *Revista facultad de ciencias economicas*, Vol. XVI (1), Junio 2008, pp. 59-70
- Moon, C. y Seo, Y. (2005). Evolutionary algorithm for advanced process planning y scheduling in a multi-plant. *Computers y Industrial Engineering* 48 (2) 311–325.
- Morganti, Eleonora. y Dablanc, Laetitia. (2014). Recent Innovation in Last Mile Deliveries. En *Non-technological Innovations for Sustainable Transport*. SpringerBriefs in Applied Sciences y Technology 2014. Springer International Publishing. pp 27-45.
- Muñoz-Villamizar, Andrés; Montoya-Torres, Jairo R. y Vega-Mejía, Carlos A. (2015). Non-Collaborative versus Collaborative Last-Mile Delivery in Urban Systems with Stochastic Demands. *Procedia CIRP* 30 (2015) pp. 263 – 268
- Muñuzuri J., Cortés p., Onieva I., Guadix J. Modelling peak-hour urban freight movements with limited data availability . *computers y Industrial Engineering* 59 pp. 34–44, 2010.
- Muñuzuri, D. y Larrañeta, J. y Onieva, L. y Cortés, P. (2005). Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. *Cities*, Vol. 22, No. 1, p. 15–28.
- Muñuzuri, J. (2003). La logística urbana de mercancías: Soluciones, modelado y Evaluación. Doctor Ingeniero Industrial, Universidad de Sevilla, Sevilla. España.
- Muñuzuri, J. y Cortés, P. y Guadix, J. y Onieva, J. (2011). City logistics in Spain: Why it might never work. *J. Cities*. doi:10.1016/j.cities.2011.03.004

- Naesens, K; Gelders, L. y Pintelon, L. (2007). A swift response tool for measuring the strategy fit for resource pooling: a case of study. *management Decision*, vol. 45, no. 3, pp. 434–449.
- Narus, J., y Anderson, J. (1996). Rethinking distribution: Adaptive. *Harvard Business Review*, 74 (4), 112–120.
- Noor N. M. y Shuib, A. (2015). “Multi-Depot Instances for Inventory Routing Problem Using Clustering Techniques”. *Journal of Industrial y Intelligent Information*, Vol. 3, No. 2, 2015.
- Noor, N. M. y Shuib, A. (2015). Multi-Depot Instances for Inventory Routing Problem Using Clustering Techniques”. *Journal of Industrial y Intelligent Information*, Vol. 3, No. 2, 2015.
- Nyaga, G., Whipple, J., y Lynch, D. (2010). Examining supply chain relationships: Do buyer y supplier perspectives on collaborative relationships differ? *Journal of Operations Management*, 28(2), 101–114.
- Ojeda Gómez, Julieta. (2009). La cooperación empresarial como estrategia de las pymes del sector ambiental. *Estudios Gerenciales*. Vol 25. Número 110. Enero-Marzo 2009. Pp. 39-61
- Ozen, U; Sobic, G. y Slikker, M. (2012). A collaborative decentralized distribution system with demand forecast updates. *European Journal of Operational Research*, vol. 216, pp. 573–583.
- PADAM (2011). Soporte técnico del plan de abastecimiento y distribución de alimentos para la ciudad de medellín. Editorial Centro De Publicaciones De La Universidad Nacional De Colombia, Sede Medellin, ISBN: 978-958-719-981-9
- Paché G. Efficient urban e-logistics: mutualization of resources y source of competitive advantage. *Proceedings of the 7th International Meeting for Research in Logistics (RIRL 2008)*, Avignon, France, 2008. p. 24-26.
- Pearce, John A. y Doh, Jonathan P. (2005). The high impact of collaborative social initiatives . *MIT Sloan management review*, ISSN 1532-9194, Vol. 46, N° 3, 2005, pp. 30-39.
- Pillac et al, 2011. A review of Dynamic Vehicle Routing Problems. *Cirrelt*
- Piplani, R., y Viswanathan, S. (2004). Supply Chain Inventory Co-ordination through Multiple, Common Replenishment Epochs y Selective Discount. *International Journal of Logistics*, 7(2), 109-118.

- Pradhananga, R., Taniguchi, E., Yamada, T. y Qureshi, A.G (2014). Bi-objective decisión support system for routing y scheduling of hazardous materials. *Socio-Economic Planning Sciences* 48 (2014) 135e148
- Quak, H. (2008). Sustainability of Urban Freight Transport Retail Distribution y Local Regulations in Cities. Tesis de Doctorado. Erasmus Research Institute of Management (ERIM). ISBN 978-90-5892-154-3
- Quak, H. y Tavasszy, L. (2011). Customized Solutions for Sustainable City Logistics: The Viability of Urban Freight Consolidation Centres. *Transitions Towards Sustainable Mobility*. pp 213-233.
- Ramkumar, N., Subramanian, P., Narendran T. y Ganesh, K. (2012). “Mixed integer linear programming model for multi- commodity multi-depot inventory routing problema”. *OPSEARCH* (Oct–Dec 2012), 49(4), pp. 413–429, 2012.
- Razavi, M. K. y Nik, E. R. (2013). Meta Heuristic for Multi Depot Inventory Routing Problem Backlogging. *J. Basic. Appl. Sci. Res.*, 3(2s), pp. 273-280.
- Richey, G; Roath, A; Whipple, J. y Fawcett, S. (2010). Exploring a governance theory of supply chain management: barriers y facilitators to integration. *Journal of Business Logistics*, vol. 31, no. 1, pp. 237–256.
- Robusté, Francesc. (2005). *Logística del transporte*. Ediciones UPC.
- Rodrigue J. y Dablanc, L. (2011). City Logistics. Disponible en <http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch6en/appl6en/ch6a2en.html>. Última visita: Septiembre de 2011
- Ruesch M. y Hegi P. y Haefeli U. y Matti D. y Schultz B. y Rüttsche P. (2007). Sustainable goods supply y transport in conurbations: Freight patterns y developments in Switzerland. 5th International conference of city logistics – sessions 2.
- Ruesch M. y Hegi P. y Haefeli U. y Matti D. y Schultz B. y Rüttsche P. (2012) Sustainable goods supply y transport in conurbations: Freight strategies y guidelines *Procedia - Social y Behavioral Sciences*. Volume 39, , Pages 116–133
- Rushton, A., Phil Croucher, P., Baker, Peter (2010). *The handbook of logistics y distribution management*. 3rd edition. Ed. Kogan Page Limited. ISBN 0-7494-4669-2
- Russo, F. y Comi, A. (2010). A classification of city logistics measures y connected impacts. *Procedia Social y Behavioral Sciences* 2 (2010) 6355–6365

- Sahin, F., y Robinson, P. (2002). Flow coordination y information sharing in supply chains: Review, implications y directions for future research. . *Decision Sciences*, 33 (4), 505–536.
- Sarmah, S., Acharya, D., y Goyal, S. (2006). Buyer–vendor coordination models in supply chain management. . *European Journal of Operational Resaarch*, 175 (1), 1-15.
- Satir, B; Savaseneril, S. y Serin, Y. (2012) Pooling through lataral transshipments in service parts systems. *European Journal of Operational Research*, vol. 220, pp. 370–377.
- Shen, D; Lai, K. K; Leung, S. y Liang, L. (2011). Modelling y analysis of inventory replenishment for perishable agricultural products with buyer–seller collaboration,” *International Journal of Systems Science*, vol. 42, no. 7, pp. 1207–1217.
- Shenfield, Alex; Fleming, Peter J. y Alkarouri, Muhammad. (2007). Computational steering of a multi-objective evolutionary algorithm for engineering design. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 20 (2007) 1047–1057
- Sheu, C., Yen, H.R., y Chae, D. (2006). Determinants of supplier-retailer collaboration: Evidence from an international study. *International Journal of Operations y Production Management*, 26(1), 24–49
- Shin, H., Benton, W., y Jun, M. (2009). Quantifying suppliers’ product quality y delivery performance: A sourcing policy decision model. *Computers y Operations Research*, 36(8), 2462-2471.
- Simatupang, T. y Sridharan, R. (2005). An integrative framework for supply chain collaboration. *International journal of logistics management*, vol. 16, pp. 257–274.
- Simatupang, T. M., y Sridharan, R. (2002). The collaborative supply chain. *International Journal of Logistics Management*, 13(1), 15–30.
- Simatupang, T., Wright, A., y Sridharan, R. (2002). The knowledge of coordination for supply chain integration. *Business Process Management Journal* ,8 (3), 289–308.
- Singer, M. y Donoso, D. (2007) Internal Supply chain management in the chilean sawmill industry. *International Journal of Operations y Production Management*, vol. 27, no. 5, pp. 524–541.
- Song, H. y Song, Y.-F. (2009). Impact of inventory management flexibility on service flexibility y performance: evidence from mainland Chinese firms. *Transportation Journal*, vol. 48, no. 3, pp. 7–19.

- Soriguera, F. y Robusté, F. (2011). Estimation of traffic stream space mean speed from time aggregations of double loop detector data. *Transportation Research Part C* 19 (2011) 115–129.
- Srinivas, N., y Deb, K. 1994. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2, 221–248.
- Sucky, E. (2005). Inventory management in supply chains:A bargaining problem. *Int. J. Production Economics*, 93-94(8), 253-262.
- Swink, M. (2006). Building collaborative innovation capability,” *Research technology Management*, vol. 49, no. 2, pp. 37–48.
- Tan, K. C. (2001). A framework of supply chain management literature. *European Journal of Purchasing y Supply Management*, 7(1), 39–48.
- Taniguchi, E. y Thompson, R.G., y Yamada, T. (2010). Incorporating risks in City Logistics. *Procedia Social y Behavioral Sciences* 2 (2010) 5899–5910
- Taniguchi, E., Thompson, R. G., Yamada, T., y van Duin, R. (2008). *City logistics. Network modelling y intelligent transport systems*. Bingley, UK: Emerald.
- Taniguchi, E., Y. Kanazaki, M. Yoshii, y S. Nishimura (2001b). Realistic application of ITS based probabilistic vehicle routing y scheduling, in E. Taniguchi y R. G. Thompson (eds.), *City Logistics II*, 127-139, Institute of Systems Science Research, Kyoto.
- Taniguchi, Eiichi (2014). Concepts of city logistics for sustainable y liveable cities. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 151 (2014) 310 – 317.
- Taniguchi, Eiichi., Thompsom, R.G., Yamada, T. Van Duin, J.H.R; (2001). *City Logistics : Network Modelling y Intelligent Transport Systems*. Ed. Pergamon.
- Taylor, G. Don. *Logistics engineering handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- Teo, Joel S. E; Taniguchi, Eiichi y Qureshi, Ali G. (2014). Evaluation of Load Factor Control y Urban Freight Road Pricing Joint Schemes with Multi-agent Systems Learning Models. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 125 (2014) 62 – 74
- Thompson, Russell. y Hassall, Kim (2014). Implementing High Productivity Freight Vehicles in Urban Areas. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 151 (2014). Pp 318 – 332

- Tiwari, A. y Roy, R. y Jared, G. y Munaux, O. (2002) Evolutionary-based techniques for real-life optimisation: development y testing. *Applied Soft Computing* 1. pp 301–329.
- Transportation Research Board (2013). NCFRP REPORT 23: Synthesis of Freight Research in Urban Transportation Planning. National Academy of Sciences.
- Trentini, Anna y Malhene, Nicolas (2012) Flow Management of Passengers y Goods Coexisting in the Urban Environment: Conceptual y Operational Points of View. *Procedia - Social y Behavioral Sciences*. Volume 39, 2012, Pages 807–817
- TURBLOG (2011), Transferability of urban logistics concepts y practices from a world wide perspective. Deliverable 3: Urban Logistics Practices - Synthesis of Selected Case Studies.
- Tušar, T. y Filipić, B. (2015). Visualization of Pareto Front Approximations in Evolutionary Multiobjective Optimization: A Critical Review y the Projection Method. *Ieee Transactions On Evolutionary Computation*, Vol. 19, No. 2, pp. 225-245.
- Universidad Nacional de Colombia., (2015). “Documento E-Transcol #3. Diagnóstico de la normatividad asociada al transporte de carga en Colombia” Sin publicar.
- Valledor Pellicer, D. Pablo. (2015). Resolución de problemas de optimización multi-Objetivo combinatorios en el entorno industrial. Tesis de Doctorado. Universidad de Oviedo. Departamento de Administración de empresas.
- Van Anholt, R., Coelho, L., Laporte, G., Vis, I. (2013). An Inventory-Routing Problem with Pickups y Deliveries Arising in the Replenishment of Automated Teller Machines. CIRRELT.
- Vergidis, K. y Saxena, D. y Tiwari, A. (2012). An evolutionary multi-objective framework for business process optimization. *Applied Soft Computing* 12 (2012) 2638–2653.
- Verlinde, Sara., Macharisb, Cathy. y Witloxa, Frank. (2012) How to consolidate urban flows of goods without setting up an urban consolidation centre? *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 39 pp. 687 – 701
- Vieira, José Geraldo; Fransoo, Jan C y Carvalho, Carla Deguirmendjian. (2015) Freight distribution in megacities: Perspectives of shippers, logistics service providers y carriers. *Journal of Transport Geography* 46. Pp. 46–54
- Villalobos, Mario A. (2005). Análisis de Heurísticas de Optimización para Problemas Multiobjetivo. Tesis Doctoral. Departamento de Matemáticas. CENTRO DE investigación y de estudios avanzados del instituto politécnico nacional. Mexico.

- Ville, S., Dablanc, L., González-Feliu, J. (2011). Los límites de las políticas públicas en el ámbito de la logística urbana: el caso de la ciudad de vincenza. En Régimen del transporte en un entorno económico incierto por Huget, J., Puettz, A., Martínez, F. Y Petit, M. V. ISBN 9788497688659, pp801-820
- Visser, Johan., Nemoto, Toshinori. y Browne, Michael. (2014). Home Delivery y the Impacts on Urban Freight Transport: A Review. *Procedia - Social y Behavioral Sciences* 125. pp 15 – 27
- Viswanathan, S., y Piplani, R. (2001). Coordinating Supply Chain Inventories Through Common Replenishment Epochs. *European Journal of Operational Research*, 129, 277-286.
- Vornhusen, Benedikt; Wang, Xin y Kopfer, Herbert. (2014). Vehicle routing under consideration of transshipment in horizontal coalitions of freight carriers. *Procedia CIRP* 19 (2014). pp. 117 – 122
- Wang, K. y Salhi, A. y Fraga, E.S. (2004). Process design optimisation using embedded hybrid visualisation y data analysis techniques within a genetic algorithm optimisation
- Whang, S. (1995). Coordination in operations: Taxonomy. *Journal of Operations Management* 12 (3-4), 413-422.
- Wilhelm, Miriam M. (2011). Managing coopetition through horizontal supply chain relations: Linking dyadic y network levels of analysis. *Journal of Operations Management* 29 (2011) 663-676
- Won Cho, Dong y Hae Lee, Young y Youn Lee, Tae y Gen, Mitsuo. (2014). An adaptive genetic algorithm for the time dependent inventory routing problema. *Journal od Intelligent*
- Wu, Z., Choi, T.Y., Rungtusanatham, M.J., 2010. Supplier-supplier relationships in buyer-supplier-supplier triads: implications for supplier performance. *Journal of Operations Management* 28 (2), 115-123.
- Yang, D., Odani, M., 2006. Study on find the expected share for logistics companies in cooperative transport system. In: *Proceedings of the fifth International Conference on Traffic y Transportation Studies*.
- Yang, P. C. y Wee, H. M. (2006). A collaborative inventory system with permissible delay in payment for deteriorating items. *Mathematical y Computer Modelling*, vol. 43, pp. 209-221.

- Yao, Y., y Dresner, M. (2008). The inventory value of information sharing, continuous replenishment, y vendor-managed inventory. *Transportation Research Part E*, 44(3), 361–378.
- Yu, J. (2010). A collaborative deteriorating inventory system with imperfect quality y shortage backordering. *International Journal of Electronic Business management*, vol. 8, no. 3, pp. 231–238.
- Yu, X. y Gen, M. (2010). *Introduction to Evolutionary Algorithms*. Springer-Verlag London Limited. New York.
- Zapata, J.A. y Arango, M.D. y Adarme, W. (2010). Herramientas tecnológicas al servicio de la gestión empresarial. *Avances en Sistemas e Informática*. Vol. 7, No 3. Diciembre de 2010. pp. 87-101.
- Zavanella, L. y Zanoni, S., “A one-vendor multi-buyer integrated production-inventory model: The ‘Consignment Stock’ case,” *International Journal of production Economics*, vol. 118, pp. 225-232, 2009
- Zeng. Z. y Zhao, J. (2010). Study of Stochastic Demand Inventory Routing Problem with Soft Time Windows Based on MDP. *Adv. in Neural Network Research y Appli.. LNEE*, 67. pp. 193–200.
- Zhang, C., Yu, H. y Liu, Z., 2008. Logistics Collaboration Supported by Electronic Logistics Marketplaces. In *IEEE Symposium on Advanced Management of Information for Globalized Enterprises, 2008. AMIGE 2008. IEEE Symposium on Advanced Management of Information for Globalized Enterprises, 2008. AMIGE 2008. IEEE*, pp. 1–5.
- Zhang, D; Liu, X. y Li, S. (2012). An optimization model for multi-period collaborative inventory control based on target performance management. *Proceedings of the 2012 IEEE 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*, pp. 930–934.
- Zhang, D., Liu, X. y Li, S., “An optimization model for multi-period collaborative inventory control based on target performance management,” *Proceedings of the 2012 IEEE 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design*, pp. 930-934, 2012.
- Zhang, T., Liang, L., Yu, Y. y Yu, Y. (2007). An integrated vendor-managed inventory model for a two-echelon system with order cost reduction. *International Journal of Production Economics*, vol. 109, no. 1–2, pp. 241–253, 2007.

- Zhang, Y; Qi, M; Miao, L. y Liu, E. (2014b) Hybrid metaheuristic solutions to inventory location routing problema. *Transportation Research Part E*, 70, pp. 305–323.
- Zhang, Yimei; Huang, Guo He y He, Li. (2014). A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system. *Waste Management* 34 (2014) 553–561
- Zhao Q.-H. and. Cheng, T. C. E. (2009). An analytical study of the modification ability of distribution centers. *European Journal of Operational Research*, vol. 194, pp. 901–910.
- Zinn, W. y A. Parasuraman (1997). Scope y intensity of logistics-based strategic alliances. *Industrial Marketing Management*, 26(2), 137-147.

Anexo A:

Caracterización de la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín

Este anexo presenta un resumen de las principales características del proceso de distribución de alimentos en la ciudad de Medellín, obtenidas a partir del Plan de Abastecimiento y distribución de Alimentos para la ciudad de Medellín (PADAM, 2011), proceso que es tenido en cuenta en la aplicación del modelo para la optimización de la distribución urbana de mercancías propuesto en esta tesis doctoral.

La distribución de alimentos en la ciudad de Medellín, está compuesta por una red de proveedores, clientes e intermediarios, los cuales pueden clasificarse de acuerdo a su naturaleza en tres grandes grupos de actores: directos, públicos, gremios y privados (PADAM, 2011), tal y como se muestra en la tabla A-1.

Tabla A-1. Actores de la cadena de suministro de alimentos

Directos	Públicos	Gremiales y privados
Productores de alimentos	Alcaldía de Medellín	Fedegan
Central mayorista de Antioquia	Dane	Fenalce
Plaza Minorista José María Villa	Secretarías municipales	Fedepapa
Grandes superficies	Departamentos municipales pertinentes	Fedecafé
Supermercados y minimercados	Comfama	Fenalco Antioquia
Tiendas de barrio	Sena	Andi
Otros actores como ONG	Departamentales de salud	Grupo Nutresa
Frigoríficos	Representantes corregimientos	Universidades
Proveedurías		Corporación Colombia internacional –cci–
Vendedores ambulantes	FAO	Instituto colombiano de comercio exterior –incomex–
Restaurantes	Ministerio de agricultura	Bolsa nacional agropecuaria
Plazas satélites	Banco agrario	Sociedad agricultores –sac–
Pequeños comerciantes		Colanta y asohofrucol

Fuente: Elaboración propia.

Estos actores están ubicados en diferentes eslabones de la cadena de suministro, organizados en cuatro niveles: Abastecedores de la ciudad (macro proveedores), mayoristas, minoristas, hogares y restaurantes (PADAM, 2011). El caso particular de la logística de ciudad que es analizado en esta tesis doctoral, corresponde a la distribución de alimentos en la zona central de la ciudad de Medellín, en la cual interactúan los dos últimos eslabones (Minoristas y hogares-restaurantes), los cuales realizan sus operaciones en lo que se conoce como la última milla logística (Brown y Guiffrida, 2014). El sistema de distribución de logística de ciudad de estudio en esta tesis doctoral está conformado por múltiples proveedores y múltiples actores.

Una vez establecidos los actores y los eslabones de la cadena de suministro que interactúan en el proceso de distribución urbana de mercancía en la zona centro de la ciudad de Medellín, es necesario analizar cada uno de los componentes de forma más detallada. Para esto se identificaron las características clave de cada uno de los actores, como demandas, ubicaciones geográficas, tipo de transporte utilizado, tipo de mercancías, tiempos de atención, costos de almacenamiento y transporte, entre otros.

A.1. Selección de actores y productos.

En la ciudad de Medellín es de gran importancia el análisis del movimiento de mercancías relacionadas con la alimentación de los ciudadanos, lo cual se refleja en los proyectos desarrollados por la Alcaldía de Medellín en la última década, como la Encuesta Nacional de la Situación Nutricional - ENSIN 2015 y ENSIN 2015 (ICBF, 2015), el Perfil Alimentario y Nutricional de Medellín 2010, el plan de Distribución y Abastecimiento de Alimentos para la Ciudad de Medellín, el Plan Municipal de Seguridad Alimentaria y Nutricional 2016 – 2028 para la ciudad de Medellín, El Programa de Alimentación Escolar (P.A.E.) de la Alcaldía de Medellín, el Perfil de Seguridad Alimentaria y Nutricional 2015, entre otros.

En la ciudad de Medellín la mayor concentración de establecimientos comerciales involucrados en el abastecimientos y distribución de alimentos se encuentra en la zona centro de ciudad, que lleva por nombre comuna número 10: La Candelaria (Alcaldía de Medellín, 2009; Padam, 2011), para la cual el número de establecimientos comerciales ascendía a los 1.421, equivalentes al 9,47% del total de la ciudad, de los cuales 355 corresponden a restaurantes. De acuerdo al PADAM, en la ciudad de Medellín los restaurantes no prestan una amplia variedad de comidas

y en el caso especial de los restaurantes ubicados en la zona central de la ciudad, estos en la mayoría de los casos solo ofrecen entre una y dos comidas diferentes. El tipo de comida tradicional es la de mayor venta, correspondiendo a la vendida por el 52% de los restaurantes, lo cual se debe a la idiosincrasia y cultura de los habitantes de la ciudad (PADAM, 2011).

El número y los restaurantes seleccionados para el análisis del modelo de distribución de mercancías, se obtuvo a partir de la información obtenida en el Plan de Abastecimiento y Distribución de Alimentos de la ciudad de Medellín, a partir del cual se tomaron aquellos establecimientos comprendidos la comuna de la Candelaria, pero más específicamente en los Barrios la Candelaria, San Benito, Guayaquil y Corazón de Jesús, los cuales corresponden a la zona de mayor dificultad de movilidad en la ciudad, debido al carácter comercial de los mismos. El número de restaurantes considerados en el estudio es de 21, que corresponden al 51,9% de los 133 restaurantes consultados en la comuna 10, los cuales corresponden a aquellos que ofrecen comida tradicional y que por ende son representativos en la ciudad. Para seleccionar estos restaurantes se excluyeron aquellos que no hacen parte de los barrios seleccionados en el estudio, que corresponden aproximadamente al 70% del área de la comuna.

Los principales proveedores de los restaurantes son la plaza minorista, las tiendas de barrio, los supermercados y los distribuidores tienda a tienda, según lo presentado en la tabla A-2, para los productos papa, arepa común y huevo, los cuales fueron seleccionados por la representatividad de estos productos en la comida tradicional antioqueña y a que corresponden a los productos de mayor demanda de los restaurantes reportados en el Plan de Abastecimiento y Distribución de Alimentos para la ciudad de Medellín (PADAM).

Tabla A-2. Principales proveedores de los productos analizados.

Producto	Demanda semanal (kg)	Costo producto (\$/Kg)	Proveedor
Papa	25	7.000	Plaza Minorista
			Plazas de mercado
			Supermercados
			Tiendas
Arepas común	58,8	4.375	Distribuidores
			Tiendas
			Plaza Minorista
			Supermercados
			Vendedores ambulantes

Producto	Demanda semanal (kg)	Costo producto (\$/Kg)	Proveedor
Huevo	9,3	7.000	Distribuidores
			Plaza Minorista
			Tienda
			Supermercados

Fuente: Elaboración propia

La plaza minorista, las tiendas y los supermercados son proveedores de los tres productos seleccionados. La plaza de mercado y los vendedores ambulantes, bajo ciertas condiciones relacionadas con la organización y la distribución de la mercancía, pueden considerarse como distribuidores, por lo cual este cuarto tipo de proveedor sería recurrente para el abastecimiento de los productos requeridos por los restaurantes de la zona de estudio.

A.2. Elementos logísticos de la distribución de alimentos en la ciudad de Medellín

En el proceso de distribución de mercancías en la ciudad de Medellín, no se encontraron empresas legalmente estructuradas que sean participantes de dicho proceso, ya que el transporte de vehículos se realiza con vehículos propios de los restaurantes o de las empresas distribuidoras (PADAM, 2011). El tipo de vehículos que se utiliza para el transporte de los productos analizados (Papa, Arepa y Huevo) según lo reportado por los restaurantes encuestados en el PADAM (2011) corresponden a vehículos propios y no especializados, encontrándose en la mayoría de los casos el uso de automóviles, es decir, no se utilizan vehículos con características especiales para el transporte de mercancías, como es el caso de vehículos refrigerados. El medio de transporte más utilizado son automóviles destinados para realizar acarreos, los cuales son modificados para lograr transportar mayores cantidades. Sin embargo, la mayoría de estos vehículos son utilizados informalmente, obteniendo un precio de transporte bajo, pero bajo riesgos de accidentalidad y deterioro de las mercancías, además de no contar con protección de seguros a las personas o a las mercancías.

Según PANAM (2011), los restaurantes de la zona centro de la ciudad de Medellín no poseen sistemas especializados para el almacenamiento de los productos estudiados, así como no utilizan costeo del almacenamiento y manejo de inventarios.

Para la atención de los restaurantes, estos han establecido franjas de tiempo preferidas para la recepción de las mercancías tal y como se presenta en la tabla A-3, en la que se observa que la preferencia de los restaurantes es recibir la mercancía entre las 6 am y 10 am, aunque existe un 11% de los encuestados que no tienen problema en que la mercancía sea entregada a cualquier hora del día.

Tabla A-3. Tiempos atención preferido por los clientes

Producto	Cualquier hora	6-10 am	10-14 pm	14-18pm	nocturno
Papa	11%	79%	3%	6%	1%
Arepa común	11%	80%	2%	7%	
Huevo	11%	80%	3%	6%	

Fuente: Elaboración propia.

Anexo B:

Relación de variables y elementos del modelo multicapa.

Este anexo presenta los elementos, variables y fuentes de información utilizadas en el modelo multicapa para la optimización multiobjetivo de la distribución urbana de mercancías mediante la colaboración en el inventario de m proveedores con n clientes. La información incluida en el modelo multicapa para las etapas estratégica y táctica es definida por el autor de la tesis de doctorado a partir de lo establecido en la propuesta de investigación que dio origen a esta tesis doctoral, como es el caso de la colaboración a través del inventario y de la formación de alianzas entre empresas (tipo y mecanismo de colaboración), así como el manejo de información que se determina por el uso del Inventario Manejado por el Vendedor, en el cual el proveedor (en este caso el conjunto de proveedores) centralizan la información y deciden sobre los planes de abastecimiento para el conjunto de los clientes.

Otros elementos para las capas estratégicas y táctica son definidos a partir del caso de estudio utilizado para la aplicación del modelo, el cual corresponde a la distribución de Alimentos en la zona centro de la ciudad de Medellín. En la selección del caso se utilizó la información obtenida en el informe del Plan de Abastecimiento y la Distribución de Alimentos de la ciudad de Medellín (PADAM, 2011), que corresponde a la información oficial más actualizada para dicho proceso de distribución en la ciudad. La información obtenida para las etapas estratégica y operativa corresponde a la estructura del proceso de distribución, tal y como se muestra en el capítulo 5 y en el anexo A. Los elementos y la fuente de información para la estructura del proceso de colaboración se presentan en la tabla B-1.

Tabla B-1. Elementos y fuentes de información para la etapa estratégica y táctica.

Elemento	Descripción	Fuente
v	Número de clientes	Definida por el evaluador a partir de PADAM (2011)
v'	Número de proveedores	
K	Número de vehículos (según las rutas)	
P	Horizonte de tiempo de la planificación.	
φ_i	costo de la penalidad por minuto en el cliente i	
Política Inventario	Política de manejo de inventario en las instalaciones de clientes y proveedores	
Actores a colaborar	Cantidad de actores y proveedores a participar en el proceso de distribución colaborativa	
Elementos a incluir en la colaboración	Se incluye colaboración en el inventario y en el transporte.	

Fuente: Elaboración propia.

En la capa operativa del modelo se utilizaron diferentes fuentes de información, tal y como se muestra en la tabla B-2, las cuales en la mayoría de los casos provienen de PADAM (2011), debido a que como se mencionó anteriormente, el caso de estudio se construyó a partir de la información contenida en esta investigación. La información utilizada es actualizada al año 2016 utilizando el índice de costos del Consumidor –IPC (DANE, 2016) y el crecimiento poblacional de la ciudad de Medellín (Alcaldía de Medellín, 2015), para las variables que lo requieran.

Tabla B-2. Relación de variables y fuentes de información para el modelo operativo.

Parámetros del modelo matemático					
Variable	Descripción	Tipo información	Fuente	Año base	Valores
h_i	costo de inventario en el cliente i.	Secundaria	PADAM (2011)	2016	Tabla 12*
lo_i	Inventario inicial cliente i	Secundaria	Calculado a partir de PADAM (2011)	2016	Tabla 12*
φ_i	tiempo de servicio en el cliente i.	Secundaria	PADAM (2011)	2016	Tabla 14*
a_i	límite inferior de tiempo en que puede ser servido el cliente i.	Secundaria	PADAM (2011)	2016	Tabla 13*, Tabla 14*
b_i	límite superior de tiempo en que puede ser servido el cliente i	Secundaria	PADAM (2011)	2016	Tabla 13*, Tabla 14*
Xc_i, Yc_i	Coordenadas ubicación de clientes	Secundaria	PADAM (2011)	2011	Figura 20*
Xcg_i, Ycg_i	Coordenadas ubicación de clientes georreferenciadas	Secundaria	Google (2016)	2016	Tabla 10*

Parámetros del modelo matemático					
Variable	Descripción	Tipo información	Fuente	Año base	Valores
d_i^t	demanda cliente i en el periodo t.	Secundaria	PADAM (2011)	2016	Tabla 11*
C_i	inventario máximo del cliente i.	Secundaria	Calculado a partir de PADAM (2011)	2016	Tabla 12*
h'_i	costo de inventario en el proveedor i.	Secundaria	PADAM (2011)	2016	Tabla 15*
C_{producto}	Costo productos	Secundaria	CMA (2016)	2016	Tabla A-2**
I'_{oi}	Inventario inicial proveedor i	Secundaria	Calculado a partir de PADAM (2011)	2016	Tabla 15*
r_i^t	Capacidad producción/disponibilidad de productos del proveedor i.	Secundaria	Calculado a partir de PADAM (2011)	2016	Tabla 15*
Xp_i, Yp_i	Coordenadas ubicación proveedores	Secundaria	PADAM (2011)	2011	Figura 20*
Xpg_i, Ypg_i	Coordenadas ubicación de proveedores georreferenciadas	Secundaria	Google (2016)	2016	Tabla 10*
Q_k	Capacidad máxima del vehículo k	Secundaria	Ford Motor Company (2016)	2016	899 kg
k	Número de vehículos	Secundaria	Definido por el modelo	2016	Definidos por el modelo.
Γ	Tiempo máximo disponible diariamente para realizar las operaciones de transporte	Secundaria	PADAM (2011)	2016	Tabla 13*, Tabla 14*
d_{ij}	Distancia de ir de i a j.	Secundaria	Google (2016)	2016	Anexo C
c_{ij}	Costo de transporte de i a j.	Secundaria	Obtenida a partir del consumo de combustible del vehículo (Ford Motor Company, 2016)	2016	Consumo promedio: 8,0 L/100km. Costo promedio Combustible = 7500 \$COP Factor: 159 \$COP/km
R_{ij}^{kt}	Tiempo de viaje de i a j por el vehículo k	Secundaria	Calculado a partir de la velocidad - DNP (2015)	2016	Factor: 0,3775 km/minuto
FEI	Factor emisión de gases efecto invernadero vehículos	Secundaria	Ford Motor Company (2016)	2016	Factor: 190-197 gCO ₂ /km
Mapa	Mapa de la zona de Estudio	Secundaria	Díaz (2011)	2011	Figura 17*

* Se encuentra en el cuerpo del documento de tesis doctoral; ** Se encuentra en el Anexo A.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo C:

Matriz de distancias

Este anexo presenta la matriz de distancias calculadas para el conjunto de clientes y proveedores que hacen parte del proceso de distribución de alimentos estudiado para la ciudad de Medellín.

En la siguiente página se muestra la matriz de distancia utilizada en el modelo.

	cliente 1	cliente 2	cliente 3	cliente 4	cliente 5	cliente 6	cliente 7	cliente 8	cliente 9	cliente 10	cliente 11	cliente 12	cliente 13	cliente 14	cliente 15	cliente 16	cliente 17	cliente 18	cliente 19	cliente 20	cliente 21	proveedor 1	proveedor 2	proveedor 3	proveedor 4
cliente 1	0	2342	1089	945	1101	1311	1226	1536	1700	1655	1382	1709	1935	2861	1641	1399	1298	1271	996	1041	2026	2128	2421	1620	5549
cliente 2	874	0	526	699	1611	773	447	758	922	1631	1736	2267	1996	2715	2834	1259	1808	1858	1506	1550	2738	3651	2799	805	5579
cliente 3	1550	2215	0	887	1884	553	848	1159	1322	2307	3058	3865	3593	3046	2860	1935	2049	1331	1575	1174	2211	2905	3921	1184	7099
cliente 4	1363	2029	119	0	2003	366	662	972	1136	2120	3177	2756	2485	3165	2979	1748	2168	1450	1694	1292	2330	3024	4040	956	7218
cliente 5	1618	3752	2154	2027	0	1995	2290	2601	3557	1683	1410	2644	2372	1825	1639	1426	262	645	912	1390	990	1684	2152	2626	5600
cliente 6	997	1663	554	729	1734	0	296	606	770	1754	1859	2390	2119	2838	2957	1382	1931	1872	1629	1673	2752	3774	2922	691	5702
cliente 7	1458	1367	1111	1283	2195	1358	0	310	474	1566	2402	2203	1932	2651	2770	2136	3207	2442	2090	2134	3655	3587	4012	1396	5515
cliente 8	1404	1057	1288	1490	3326	1564	1174	0	533	1256	2092	1893	1622	2341	2460	1826	2897	3001	2267	2311	3345	3277	3702	1086	5205
cliente 9	1532	1185	1417	1618	3454	1692	1302	615	0	1384	2220	2021	1750	2469	2588	1954	3025	3129	2396	2440	3473	3405	3830	1214	5333
cliente 10	351	1769	1440	1296	1306	1662	1577	1887	1574	0	1047	1398	1600	1516	1330	570	1565	1388	1263	1392	1885	1817	2110	1971	5569
cliente 11	984	1269	1820	1701	2257	2067	1687	2434	1074	614	0	824	553	1303	1391	788	1828	2328	2600	2956	2556	2239	2664	2046	4167
cliente 12	822	1160	1711	1592	1936	1958	1578	1580	965	471	199	0	475	1295	1070	648	1507	2007	2279	2635	2235	2231	2220	1937	4159
cliente 13	1094	1432	3168	1864	1705	3009	3304	1852	1237	743	471	272	0	784	839	975	1276	1776	2048	2404	2004	1696	1989	3640	4431
cliente 14	1836	2169	2721	2602	2494	2968	2587	2303	1974	1532	1260	1061	789	0	1628	1764	2065	2565	2837	3193	1906	1838	2263	2888	3766
cliente 15	1310	2063	2599	2472	1021	2440	2735	3046	1868	1374	1102	1165	1418	1284	0	1118	707	1097	1363	1835	1435	1355	1647	3071	5563
cliente 16	1208	1961	2136	2008	736	1977	2272	2583	1766	1272	999	1326	1552	2496	1258	0	933	818	1084	1384	1661	1745	2038	2607	5166
cliente 17	1478	2231	1823	1696	429	1664	1959	2270	2036	542	1270	2837	2565	2018	1832	1286	0	500	772	1071	1183	1877	2345	2295	5793
cliente 18	1602	2355	1606	1479	553	1447	1742	2053	2216	1666	1394	1909	1947	2377	1678	1410	814	0	580	854	1542	2236	2458	2078	6152
cliente 19	1546	2451	1226	1126	1308	1067	1362	1673	1836	2303	2024	2939	2668	3236	3050	1931	1570	1221	0	473	2401	3095	4111	1697	6251
cliente 20	1363	2638	1171	1028	835	1229	1524	1835	1998	1824	551	1878	2104	2581	1810	1568	1097	960	685	0	1746	2297	2590	1860	6356
cliente 21	1969	3524	3133	3006	1670	2974	3269	3658	3329	2033	1761	2416	2144	1597	1519	1777	1241	1741	2013	2369	0	694	1162	3605	5078
Provee. 1	1764	3471	2439	2312	976	2280	2575	2886	3276	1828	1556	2363	2091	1544	1358	1572	547	1047	1319	1675	709	0	1871	2911	5319
Provee. 2	2145	3584	4008	3881	2770	3849	4144	3718	3389	2227	1938	1881	2204	1657	1904	1954	2341	2841	3113	3244	1743	1675	0	4480	4260
Provee. 3	1285	1666	893	1017	2022	682	299	610	773	1865	2147	2502	2231	2950	3069	1670	2219	2429	1917	1961	3309	3886	4311	0	5814
Provee- dor 4	5355	5497	6049	5930	5864	6296	5915	5631	5302	4902	4630	4431	4159	4291	4998	5134	5435	5935	6207	6563	5068	5000	3638	6216	0

Anexo D:

Código de programación del modelo genético multiobjetivo

En este anexo se presenta parte código para las rutinas principales del modelo genético multiobjetivo, el cual fue programado utilizando el lenguaje de programación JAVA, con el uso del entorno de programación NetBeans®, con el objetivo de ejemplificar la programación del modelo genético multiobjetivo propuesta en esta tesis doctoral. Los elementos del código presentados en este anexo son la rutina principal y el algoritmo central, para lo cual se muestran las clases en JAVA que los contienen.

D.1. Código clase principal

```
public class MAIN {
private static final double MUTATION_PROBABILITY = 0.2;
public static final double CROSSOVER_PROBABILITY = 1;
private static final int POPULATION_SIZE = 200;
private static final int NUMBER_OF_GENERATIONS = 300;
private static File instanceFile;
static Evaluacion fitnessFunction1 = new Evaluacion(Evaluacion.Objective.OBJECTIVE_1);
static Evaluacion fitnessFunction2 = new Evaluacion(Evaluacion.Objective.OBJECTIVE_2);
static Evaluacion fitnessFunction3 = new Evaluacion(Evaluacion.Objective.OBJECTIVE_3);
static Evaluacion[] fitnessFunctions = new Evaluacion[3];
private static Individual ruta;
static LinkedList<Individual> mejores;
```

```
public static void main (String[] args) throws Exception {  
fitnessFunctions[0] = fitnessFunction1;  
fitnessFunctions[1] = fitnessFunction2;  
fitnessFunctions[2] = fitnessFunction3;
```

```
NSGA2Configuration conf = new NSGA2Configuration(fitnessFunctions,MUTATION_  
PROBABILITY,CROSSOVER_PROBABILITY,POPULATION_SIZE,NUMBER_OF_GENERATIONS);  
NSGA2 correr = new NSGA2(conf);  
instanceFile = new File("instancias/matriz-final.txt");  
String fileName = instanceFile.getAbsolutePath();  
matrizCosto julio = new matrizCosto(fileName);
```

```
LinkedList<Individual> startPopulation = new LinkedList<Individual>();  
for (int i=0; i<POPULATION_SIZE; i++){  
ruta= INDIVIDUOMD.generaIngividuoAleatorio(correr);  
startPopulation.add(ruta);  
}  
mejores = correr.evolve(startPopulation);  
}  
}
```

D.2. Código algoritmo central

```
public class NSGA2 {  
private static NSGA2Configuration conf;  
private HashSet<NSGA2Listener> nsga2listeners;  
static int contador =0;  
  
public NSGA2(NSGA2Configuration conf) {  
if (conf == null) {  
throw new IllegalArgumentException("'conf' must not be null.");  
}  
this.conf = conf;
```



```

nsga2listeners = new HashSet<NSGA2Listener>();
}

public static NSGA2Configuration getNSGA2Configuration() {
return conf;
}

public LinkedList<Individual> evolve(LinkedList<Individual> startPopulation) {
if (startPopulation == null) {
throw new IllegalArgumentException("'startPopulation' must not be null.");
}
if (startPopulation.size() != conf.getPopulationSize()) {
throw new IllegalArgumentException("Incorrect start population size.");
}
for (Individual individual : startPopulation) {
if (individual.nsga2 != this) {
throw new IllegalArgumentException("All individuals in start population must have this
NSGA-II instance.");
}
}
}

LinkedList<Individual> population_p_t = startPopulation;

for (int numberGeneration = 1; numberGeneration <= conf.getNumberOfGenerations();
numberGeneration++) {
// call NSGA-II listeners
if (!nsga2listeners.isEmpty()) {
LinkedList<LinkedList<Individual>> temp = fastNonDominatedSort(population_p_t);
// only return non-dominated individuals (=> first frontier)
LinkedList<Individual> bestIndividuals = temp.getFirst();

NSGA2Event event = new NSGA2Event(this, bestIndividuals, numberGeneration - 1);
for (NSGA2Listener listener : nsga2listeners) {

```

```
listener.performNSGA2Event(event);
}
}

LinkedList<Individual> population_q_t = makeNewPopulation(population_p_t);
LinkedList<Individual> population_r_t = union(population_p_t, population_q_t);
LinkedList<LinkedList<Individual>> dominationFronts =
fastNonDominatedSort(population_r_t);
LinkedList<Individual> population_p_t_l = new LinkedList<Individual>();
int i = 0;
while (dominationFronts.get(i) != null
yy population_p_t_l.size() + dominationFronts.get(i).size() <= conf.getPopulationSize()) {
crowdingDistanceAssignment(dominationFronts.get(i));
population_p_t_l.addAll(dominationFronts.get(i));
i++;
}
if (population_p_t_l.size() != conf.getPopulationSize()) {
crowdingDistanceAssignment(dominationFronts.get(i));
Individual[] sortedIndividuals = sort(dominationFronts.get(i));
int numberOfMissingIndividuals = conf.getPopulationSize() - population_p_t_l.size();
for (i = 0; i < numberOfMissingIndividuals; i++) {
population_p_t_l.add(sortedIndividuals[i]);
}
}

population_p_t = population_p_t_l;
System.out.println("evolucion " + numberGeneration);
}

LinkedList<LinkedList<Individual>> temp = fastNonDominatedSort(population_p_t);
LinkedList<Individual> bestIndividuals = temp.getFirst();

NSGA2Event event = new NSGA2Event(this, bestIndividuals, conf.getNumberOfGenerations());
```

```
for (NSGA2Listener listener : nsga2listeners) {
    listener.performNSGA2Event(event);
}
}

double[] fv_final;
for (int j=0; j<bestIndividuals.size(); j++){
    fv_final = new double[conf.getNumberOfObjectives()];
    for (int i = 0; i < fv_final.length; i++) {
        fv_final[i] = conf.getFitnessFunction(i).evaluate(bestIndividuals.get(j));
    }
}
return bestIndividuals;
}

private static LinkedList<Individual> makeNewPopulation(LinkedList<Individual>
individuals) {
    if (individuals == null) {
        throw new IllegalArgumentException("'individuals' must not be null.");
    }
    if (individuals.size() % 4 != 0) {
        throw new IllegalArgumentException("Size of 'individuals' must be divisible by four.");
    }
    LinkedList<Individual> newPopulation = new LinkedList<Individual>();
    Individual[] a1 = new Individual[individuals.size()];
    Individual[] a2 = new Individual[individuals.size()];

    for (int i = 0; i < individuals.size(); i++) {
        a1[i] = individuals.get(i);
        a2[i] = individuals.get(i);
    }

    for (int i = 0; i < individuals.size(); i++) {
        int randomIndex = randomNumber(i, individuals.size());
```

```
Individual temp = a1[randomIndex];
a1[randomIndex] = a1[i];
a1[i] = temp;

randomIndex = randomNumber(i, individuals.size());
temp = a2[randomIndex];
a2[randomIndex] = a2[i];
a2[i] = temp;
}

for (int i = 0; i < individuals.size(); i += 4) {
Individual parent1 = binaryTournament(a1[i], a1[i + 1]);
Individual parent2 = binaryTournament(a1[i + 2], a1[i + 3]);

Individual child1 = (Individual)parent1.clone();
Individual child2 = (Individual)parent2.clone();

newPopulation.add(RealIndividual.cruzar(child1, child2));
newPopulation.add(RealIndividual.cruzar( child2,child1));

parent1 = binaryTournament(a2[i], a2[i + 1]);
parent2 = binaryTournament(a2[i + 2], a2[i + 3]);

child1 = (Individual)parent1.clone();
child2 = (Individual)parent2.clone();

newPopulation.add(RealIndividual.cruzar(child1, child2));
newPopulation.add(RealIndividual.cruzar( child2, child1));
}

for (int i = 0; i < individuals.size(); i++) {
Individual mutante = newPopulation.get(i);
newPopulation.set(i, RealIndividual.mutar(mutante));
```

```
}  
  return newPopulation;  
}  
}
```