

## PLANEACIÓN DE LA OPERACIÓN LOGÍSTICA DE UN PARTICULAR CENTRO DE DISTRIBUCIÓN

**María Paula Ramírez-Tovar**  
Pontificia Universidad Javeriana  
Carrera 7 No. 40 – 62, Bogotá, Colombia  
[ramirezm@javeriana.edu.co](mailto:ramirezm@javeriana.edu.co)

**Rafael Guillermo García-Cáceres**  
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito  
AK.45 No.205-59 (Autopista Norte), Bogotá, Colombia  
[rafael.garcia@escuelaing.edu.co](mailto:rafael.garcia@escuelaing.edu.co)

**Juan Pablo Caballero-Villalobos**  
Pontificia Universidad Javeriana  
[juan.caballero@javeriana.edu.co](mailto:juan.caballero@javeriana.edu.co)

### RESUMEN

Este trabajo desarrolla un MIP dinámico para la planeación de despachos y desembarques en un centro de distribución que recibe productos de una planta de producción, bodegas auxiliares y proveedores del exterior. El problema contiene elementos de problemáticas relacionadas con la planeación de la cadena de abastecimiento, y operaciones de alistamiento y preparación de pedidos dentro de un centro de distribución. El objetivo del modelo es minimizar los costos de la cadena logística. Las restricciones consideradas son: capacidad de almacenamiento, capacidad de manipulación en muelles de recepción y descargue; y las decisiones: la manera cómo se desarrollan las operaciones de llegada del producto a la bodega principal y las operaciones de despacho hacia otras zonas o clientes para satisfacer la demanda de la cadena de abastecimiento. La problemática busca modelar la realidad de los sistemas logísticos en países en desarrollo, tal como se estableció con el estudio de la literatura.

**PALABRAS CLAVE.** Cadena de abastecimiento táctica, Planeación de centro de distribución, meta-heurística.

Área principal (Logística y Transporte (L&T), OR en la Industria (IND), Programación Matemática (PM))

### ABSTRACT

This paper develops a dynamic MIP for the planning of dispatches and unloading in a distribution center that receives products from a production plant, auxiliary warehouses and foreign suppliers. The problem contains elements of planning issues related to supply chain and operations readiness and preparation of orders in a distribution center. The aim of the model is to minimize the costs of the supply chain. The constraints considered are: storage capacity, handling capacity of receiving and unloading at certain docks; and the considered decisions were: the way operations are carried out when the product arrives to the main warehouse and dispatch operations to other areas or customers to meet the demand of the supply chain. The problem seeks to model real issues of logistics systems in developing countries, as was established in the literature review.

**KEYWORDS.** Tactic Supply Chain, Distribution Center Planning, Metaheuristics.

Main area (Logistics and Transport (L&T), OR in Industry (IND), Mathematical Programming (PM))

## 1. Introducción

Las instalaciones logísticas de almacenamiento son entidades fundamentales para regular el comportamiento del flujo de la cadena de abastecimiento (Stet, 2007). La toma de decisiones acertada y ágil en la administración de esta clase de sistemas es un factor diferenciador en un mercado globalizado. Por tal motivo, los sistemas de soporte para la toma de decisiones se convierten en herramientas que pueden incidir de manera significativa en la competitividad y sostenibilidad empresarial de las compañías involucradas.

Este trabajo se centra en la planeación de las operaciones de recepción, alistamiento y despacho de transporte terrestre en un centro de distribución (CD) que coordina las funciones de almacenamiento y distribución, para satisfacer a clientes a nivel doméstico y global. Hoy en día, por razones económicas, geográficas y de infraestructura, es común encontrar empresas que operan con sistemas logísticos ineficientes y poco especializados, que dificultan su administración y control, y limitan la competitividad empresarial y el nivel de servicio al cliente.

La problemática abordada se representa en la Figura 1. La operación logística se centra en un CD donde se desarrollan las operaciones de recepción, alistamiento y despacho de mercancías en un horizonte de planeación. La recepción en el CD puede provenir de proveedores, almacenes externos y de la planta de producción. Estas recepciones son manejadas por el recurso humano con ayuda de los equipos de manipulación disponibles para la operación de alistamiento de los pedidos. En el proceso, los almacenes auxiliares actúan como amortiguadores de la demanda y como auxilio del CD, cuando las fluctuaciones en los niveles de producción y la demanda de los clientes superan sus posibilidades de almacenamiento y manejo de mercancía. Los almacenes externos suelen estar, en este tipo de sistemas, limitados al desarrollo de operaciones de transferencia de productos exclusivamente con el CD, siendo prohibitivo para ellos la coordinación de despachos y recepciones de producto con los proveedores y los clientes. Las decisiones comprenden la dinámica de los flujos entre los links de las etapas de provisión, producción, manipulación y distribución, la infraestructura necesaria para el desarrollo de las operaciones, los elementos que intervienen en el transporte y el nivel de actividad de los muelles. Las restricciones del sistema se asocian a capacidades de almacenamiento, capacidades de manipulación, tipología de los vehículos que intervienen en el transporte de productos, así mismo, a las posibilidades de coordinación de transferencias de bienes entre las instalaciones y la satisfacción del cliente, medida en términos de cumplimiento de la demanda. En cuanto al objetivo del problema, se pretenden minimizar los costos totales del sistema objeto de investigación. Para la solución de instancias medianas y grandes del problema se desarrolló un procedimiento de solución que utiliza GRASP junto con el solver LINGO 10. Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad y un análisis estadístico. El primero busca encontrar alternativas de mejoramiento que conllevan a una reducción de costos, sin afectar el nivel de servicio al cliente y la fase experimental tiene como objeto analizar los resultados obtenidos con la combinación de LINGO+GRASP.

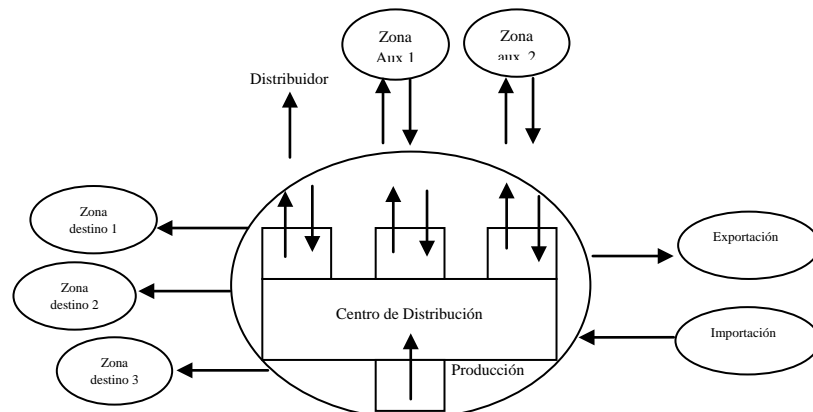


Figura 1. Descripción del sistema analizado

Este artículo está organizado de la siguiente manera, la segunda sección describe el estado del arte, la tercera y cuarta, hacen referencia a la explicación del problema y el desarrollo del modelo matemático, respectivamente, la quinta se refiere al procedimiento de solución, y finalmente, se discuten las conclusiones.

## 2. Revisión Literaria

La literatura muestra que la problemática abordada contempla elementos de tres problemas logísticos clásicos, cadena de abastecimiento (CA), cross-docking y manejo de materiales. Particularmente, el problema de manejo de materiales involucra la capacidad en volumen y pesos de bodegas y vehículos; el problema de CA comprende el flujo de producto entre los diferentes nodos, considerando la oferta y la demanda de cada uno de ellos y el problema de cross-docking permite modelar el proceso de planeación de los vehículos, considerando el periodo específico en que estos deben iniciar y finalizar traslados, según la necesidad de producto que se presente. Sin embargo, a diferencia del tratamiento común que se le da al cross-docking, donde el horizonte de planeación es de 24 horas, este problema analiza un horizonte que contempla periodos diarios.

Trabajos asociados a crossdocking y a la cadena de abastecimiento, (Bartholdi & Gue, 2000) presentan la reducción de costos de labor en terminales de cross-docking considerando las congestiones que se puedan presentar. Por su parte, (Yu & Egbelu, 2008) se enfocaron en la programación de las entradas y salidas de camiones en una bodega con almacenamiento temporal. (Miao et. al., 2009) abordan el tema de la disminución de costos totales dentro de centro de crossdocking considerando restricciones de tiempo operacional. (Sung & Song, 2003) tratan el diseño de una red de servicios integrados de demanda de transporte de mercancías que considera nodos de origen, terminales de cross-docking y nodos de destino. Se utilizaron 30, 50 y 80 nodos y se usó búsqueda Tabú para su solución. (Ross & Jayaraman, 2008) se enfocan en el diseño de la CA teniendo en cuenta cross-docks y centros de distribución. La característica fundamental del trabajo es la inclusión de diferentes tipos de productos, así como una planta de manufactura, diferentes cross-docks, diferentes zonas de clientes y centros de distribución. Los resultados indican que la integración de recocido simulado y búsqueda Tabú muestran un buen desempeño en esta clase de problemas. (Eskigun et. al., 2005) aborda el diseño de una red de entrega de la cadena de abastecimiento, considerando tiempos de entrega y capacidades tanto de las localizaciones, como de los vehículos. Para el método de solución se realiza una heurística lagrangiana con la que se obtienen excelentes resultados en tiempos mínimos de ejecución.

Trabajos asociados a programación de despachos de vehículos y redes, (Fenga et. al., 2004) realizaron un estudio relacionado con el despacho de camiones con transporte de cemento mixto listo, el cual tuvo como característica fundamental la determinación de la cantidad de obras que debían ser abastecidas y la rapidez con la que se debía actuar para cada tipo de material. (Tan & Tang, 2001) presentan un sistema de despacho para una flota de vehículos guiados en un ambiente de manufactura flexible bajo el uso del enfoque Fuzzy-Taguchi. (Subramaniam & Gosavi, 2004) se focalizaron en la disminución del costo promedio de la operación del sistema mediante el uso de técnicas de superficies de respuesta neuronal y recocido simulado. (Tsouros y Satratzemi, 1996) desarrollaron un método que permite disminuir el costo total de entrega, que vincula a centros de demanda, centros de abastecimiento, múltiples productos, costos de instalación y considera tiempos de entrega. El problema es solucionado mediante un algoritmo propuesto por los autores y al final se realiza un ejemplo numérico. (Kim & Kim, 2000) se enfocaron en un problema de planeación de inventario y distribución multi-periodo en una bodega que cuenta con múltiples retailers y vehículos heterogéneos para la entrega de productos. El objetivo del problema es minimizar los costos de transporte de la entrega y los costos de inventario. Este es formulado como un problema mixto entero y es resuelto mediante un enfoque de relajación lagrangiana. (Popken, 1994) desarrolla un modelo de flujo de redes que involucra atributos como el volumen, el peso y el costo de mantener el inventario que es resuelto con un algoritmo híbrido que utiliza técnicas de linealización, para encontrar óptimos locales y una heurística de búsqueda local basada en el flujo adyacente cóncavo. (Mejía & Castro, 2007)

proponen un modelo de decisión que consiste en el análisis de dos tipos diferentes de embalaje utilizados por una empresa. Los tipos de embalaje involucran diferentes políticas de empaque y envío. La función objetivo del modelo se plantea en términos de disminución de costos y se puede apreciar un análisis de sensibilidad que permite a la empresa objeto de estudio, contemplar distintos escenarios en el presente y en un futuro cercano.

No se encontraron, en la literatura, referentes directos que abarcaran la problemática tratada en el siguiente trabajo.

### 3. Definición de la Problemática

La siguiente es la notación y el planteamiento del modelo matemático que representa el problema presentado:

#### 3.1. Conjuntos

$B$ Zonas auxiliares	$C$ Camiones
$D$ Zonas de demanda	$R$ Exportaciones
$I$ Importación	$F$ Distribuidores
$T$ Periodos de tiempo	$K$ Productos (considera tipo de embalaje y origen)

#### 3.2. Índices

$i$  camión,  $b$  zona auxiliar,  $d$  zona de destino,  $k$  productos,  $t, v, j$  tiempo,  $m$  origen importación,  $f$  distribuidores,  $s$  zona exportación.

#### 3.3. Parámetros

$CA_b$ : Costo unidad de peso almacenado en las zonas auxiliares
$CA$ : Costo unidad de peso almacenado en la bodega principal
$CFAL_z$ : Costo unidad de peso de faltante de producto, siendo $z$ para las zonas de destino el subíndice $d$ , para los distribuidores el subíndice $f$ y para las exportaciones el subíndice $s$
$CI_k$ : Costo unitario de importar producto $k$
$CK_b$ : Costo del servicio del almacenamiento externo por unidad de peso en la zona auxiliar $b$
$CKD_d$ : Costo del servicio del almacenamiento externo por unidad de peso en la zona de destino $d$
$CKS_s$ : Costo del servicio del almacenamiento externo por unidad de peso de una exportación en el puerto de cargue
$CM$ : Capacidad de manejo dentro de los muelles
$CSRURP_d$ : Costo unidad de peso de exceso de producto disponible para las zonas de destino
$CSRURPF_f$ : Costo unidad de peso de exceso de producto disponible para los distribuidores
$CSRURPS_s$ : Costo unidad de peso de exceso de producto disponible para las exportaciones
$CT_i$ : Costo promedio de vehículo tipo $i$
$CF_k$ : Costo de producción de una unidad de peso de producto $k$
$D_{d,k}^t$ : Demanda de la zona de destino $d$ por el artículo $k$ en el periodo $t$
$D_{f,k,i}^t$ : Demanda del distribuidor $f$ en el camión $i$ del producto $k$ en el periodo $t$
$D_{s,k}^t$ : Demanda del cliente de exportación $s$ del producto $k$ en el periodo $t$
$FL_s$ : Costo del flete al destino de exportación $s$
$N_i$ : Número de camiones tipo $i$
$P_k$ : Peso producto $k$
$Q_k^t$ : Capacidad máxima de producir el artículo $k$ en el periodo $t$
$QC_z$ : Capacidad en unidad de peso, siendo $z$ , para las zonas auxiliares el subíndice $b$ , para las zonas de destino el subíndice $d$ y no presentando subíndice para el CD
$QD_z$ : Capacidad en unidad de volumen, siendo $z$ , para las zonas auxiliares el subíndice $b$ , para las zonas de destino el subíndice $d$ y no presentando subíndice para el CD
$QK_i$ : Capacidad en unidad de peso del camión tipo $i$
$QV_i$ : Capacidad en volumen del camión tipo $i$
$SS_k$ : Nivel de seguridad en la bodega principal del producto $k$
$TSE_k$ : Tasa de seguro para el producto $k$

$V_k$ : Volumen producto k

### 3.4. Variables

$a_i^t$  = Número de camiones tipo i que se encuentran disponibles en el periodo t

$e_{s,k,i}^{jv}$  = Unidades del producto k que comienzan traslado desde el CD en el periodo j y finalizan traslado en el periodo v en un destino de exportación (puerto marítimo) en el camión i

$f_{k,i}^t$  = Unidades del producto k que son entregadas a los distribuidores en el periodo t

$falt_{d,k}^t$  = Unidades faltantes de un producto k para satisfacer la demanda de zonas de destino en un periodo t

$faltf_{f,k}^t$  = Unidades faltantes de un producto k para satisfacer la demanda de distribuidores en un periodo t

$falts_{s,k}^t$  = Unidades faltantes de un producto k para satisfacer la demanda de exportaciones en un periodo t

$g_{m,k}$  = Unidades del producto k trasladadas desde el origen de importación m (puerto marítimo) hasta el CD, al inicio del horizonte de planeación (periodo 1).

$ii_k^t$  = Inventario inicial de producto k, en el CD en el periodo t

$ii_{b,k}^t$  = Inventario inicial de producto k, en la zona auxiliar b en el periodo t

$pp_k^t$  = Unidades producidas del artículo k en el periodo t

$surp_{d,k}^t$  = Unidades sobrantes de un producto k para satisfacer la demanda de zonas de destino en un periodo t

$surpf_{f,k}^t$  = Unidades sobrantes de un producto k para satisfacer la demanda de distribuidores en un periodo t

$surps_{s,k}^t$  = Unidades sobrantes de un producto k para satisfacer la demanda de exportaciones en un periodo t

$u_{z,i}^{jv}$  = Número de vehículos que satisfacen los requerimientos de carga tanto en peso como en volumen, considerando un periodo de inicio de traslado j y un periodo de finalización de traslado v. Siendo z, d para las zonas de destino, e para las zonas de exportación, b y y para las zonas auxiliares

$ud_{d,i}^{jv}$  = Número de camiones tipo i que se requieren, según la capacidad en unidades de peso, para el traslado de carga desde el CD a la zona destino d, desde el periodo j hasta el periodo v

$ue_{s,i}^{jv}$  = Número de camiones tipo i que se requieren, según la capacidad en unidades de peso, para el traslado de carga desde el CD hasta la zona de exportación s, desde el periodo j hasta el periodo v

$ux_{b,i}^{jv}$  = Número de camiones tipo i que se requieren, según la capacidad en unidades de peso, para el traslado de carga desde el CD a la zona auxiliar b desde el periodo j hasta el periodo v

$uy_{b,i}^{jv}$  = Número de camiones tipo i que se requieren, según la capacidad en unidades de peso, para el traslado de carga desde la zona auxiliar b al CD desde, el periodo j hasta el periodo v

$ud_{v,d,i}^{jv}$  = Número de camiones tipo i que se requieren, según la capacidad en unidades de volumen, para el traslado de carga desde el CD a las zonas destino desde el periodo j hasta el periodo v

$ue_{v,s,i}^{jv}$  = Número de camiones tipo i que se requieren, según la capacidad en unidades de volumen, para el traslado de carga desde el CD hasta zonas de exportación desde el periodo j hasta el periodo v

$ux_{v,b,i}^{jv}$  = Número de camiones tipo i que se requieren, según la capacidad en unidades de volumen, para el traslado de carga desde el CD a las zonas auxiliares desde el periodo j hasta el periodo v

$uy_{b,i}^{jv}$  = Número de camiones tipo  $i$  que se requieren, según la capacidad en unidades de volumen, para el traslado de carga desde el CD a las zonas auxiliares desde el periodo  $j$  hasta el tiempo  $v$

$w_{b,k,i}^t$  = Unidades del producto  $k$  que inician traslado del CD a la zona auxiliar  $b$  en el periodo  $t$  en el camión  $i$

$x_{d,k,i}^{jv}$  = Unidades del producto  $k$  que inician traslado desde el CD en el periodo  $j$  y finalizan traslado en el periodo  $v$  en la zona de destino  $d$ , en el camión  $i$

$y_{b,k,i}^t$  = Unidades del producto  $k$  que inician traslado de la zona auxiliar  $b$  al CD en el periodo  $t$ , en el camión  $i$ .

### 3.5. Objetivo P1

La función objetivo está dada en términos de minimización de los costos que hacen parte de la operación normal del sistema:

$$\begin{aligned} \text{MIN } Z = & \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} CA_{ii_k}^t P_k + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{b \in B} CA_b \dot{u}_{b,k}^t P_k + \\ & \sum_{j \in T} \sum_{i \in C} \sum_{v \in T} CT_i (u_{-d_i}^{jv} + u_{-s_i}^{jv}) + \sum_{i \in C} \sum_{t \in T} CT_i (u_{-b_i}^t + u_{-y_i}^t) + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} pp_k^t CF_k + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{b \in B} \sum_{i \in C} CK_b w_{b,k,i}^t P_k + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{s \in R} \sum_{i \in C} CKS_s e_{s,k,i}^t P_k + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} \sum_{i \in C} CKD_d x_{d,k,i}^t P_k \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{m \in I} CI_k g_{m,k} P_k + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} CFAL_d falt_{d,k}^t P_k \\ & + \sum_{i \in T} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} CFAL_f falt_{f,k}^t P_k + \sum_{i \in T} \sum_{k \in K} \sum_{s \in R} CFAL_s falts_{s,k}^t P_k + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{d \in D} CSRURP_d surp_{d,k}^t P_k + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} CSRURPF_f surp_{f,k}^t P_k + \\ & \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{s \in R} CSRURPS_s surp_{s,k}^t P_k + \sum_{s \in R} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{i \in C} (FL_s + TSE_k) e_{s,k,i}^t P_k \end{aligned}$$

### 3.6. Restricciones P1

**Capacidad en peso de los camiones utilizados en un periodo:**

**Zonas de destino:**

$$QK_i u_{d,i}^{jv} \geq \sum_{k \in K} x_{d,k,i}^{jv} P_k \quad d \in D, i \in C, j \in T, v \in T$$

(1)

De la misma manera se plantean las restricciones de las zonas de exportación y zonas auxiliares.

**Capacidad en volumen de los camiones utilizados en un periodo:**

**Zonas de destino:**

$$QV_i \quad ud_{d,i}^{jv} \geq \sum_{k \in K} x_{d,k,i}^{jv} V_k \quad d \in D, i \in C, j \in T, v \in T \quad (2)$$

De la misma manera se plantean las restricciones de las zonas de exportación y zonas auxiliares.

**Tamaño de la flota en uso:**

$$u_i^{\alpha \delta} = \overline{MAX\{u_i^{\alpha \delta}, \underline{u}_i^{\alpha \delta}\}} \quad (3)$$

Donde:

$u_i^{\alpha \delta}$ : Número de vehículos que satisfacen los requerimientos de carga tanto en peso como en volumen

$\overline{u}_i^{\alpha \delta}$ : Número de vehículos que satisfacen los requerimientos de carga en peso

$\underline{u}_i^{\alpha \delta}$ : Número de vehículos que satisfacen los requerimientos de carga en volumen

**Camiones disponibles en el periodo:**

$$a_i^t = N_i - \left( \sum_{v=t}^n \sum_{j=1}^{t-1} (u_{d,i}^{jv} + u_{s,i}^{jv}) + u_{b,i}^t + u_{y,i}^t \right) \quad i \in C, t \in T \quad (4)$$

**Inicialización de inventarios:**

$$ii_k^t \geq SS_k \quad k \in K, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{t \in T} D_{d,k}^t \sum_{s \in R} \sum_{t \in T} D_{s,k}^t + \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} \sum_{i \in C} D_{f,k,i}^t \geq \sum_{m \in I} g_{m,k} \quad k \in K, k \text{ es producto importado} \quad (6)$$

**Inventario inicial importado:**

$$ii_k^1 = \sum_{m \in I} g_{m,k} + SS_k \quad k \in K, k \text{ es producto importado} \quad (7)$$

**Inventario inicial producto no importado:**

$$ii_k^1 = SS_k \quad k \in K, k \text{ es producto no importado} \quad (8)$$

**Balance de masa en bodega principal:**

$$ii_k^{t+1} = ii_k^t + \sum_{i \in C} \sum_{b \in B} y_{b,k,i}^t - \sum_{i \in C} \sum_{b \in B} w_{b,k,i}^t - \sum_{i \in C} \sum_{d \in D} \sum_{v=t+1}^n x_{d,k,i}^{tv} + pp_k^t - \sum_{i \in C} \sum_{f \in F} f_{f,k,i}^t - \sum_{s \in R} \sum_{i \in C} \sum_{v=t+1}^n e_{s,k,i}^{tv} \quad t \in T, k \in K, v \in T \quad (9)$$

**Balance de masa en zonas auxiliares:**

$$ii_{b,k}^{t+1} = ii_{b,k}^t - \sum_{i \in C} y_{b,k,i}^t + \sum_{i \in C} w_{b,k,i}^t \quad b \in B, t \in T, k \in K \quad (10)$$

**Capacidad de almacenamiento:**

**Zonas auxiliares:**

$$\sum_{k \in K} ii_{b,k}^t P_k \leq QC_b \quad b \in B, t \in T$$

**Bodega principal (CD):**

$$\sum_{k \in K} ii_k^t P_k \leq QC \quad t \in T$$

**Zonas de destino:**

$$\sum_{i \in C} \sum_{k \in K} \sum_{v=1}^{t-1} x_{d,k,i}^{v,t} P_k \leq QC_d \quad t \in T, d \in D$$

(11)

De la misma manera se establecen las restricciones en términos de capacidad de volumen.

**Capacidad de manejo de producto en el CD:**

$$CM \geq \sum_{d \in D} \sum_{i \in C} \sum_{k \in K} \sum_{v=t+1}^n x_{d,k,i}^{t,v} + \sum_{b \in B} \sum_{i \in C} \sum_{k \in K} y_{b,k,i}^t + \sum_{i \in C} \sum_{b \in B} \sum_{k \in K} w_{b,k,i}^t + \sum_{i \in C} \sum_{k \in K} \sum_{f \in F} f_{f,k,i}^t + \sum_{s \in R} \sum_{i \in C} \sum_{k \in K} \sum_{v=t+1}^n e_{s,k,i}^{t,v} \quad t \in T, v \in T$$

(12)

**Cota de producción:**

$$pp_k^t \leq Q_k^t \quad k \in K, t \in T$$

(13)

**Manejo de la demanda:**

**Demanda de zonas de destino:**

$$D_{d,k}^t - \sum_{v=1}^{t-1} \sum_{i \in C} x_{d,k,i}^{v,t} = falt_{d,k}^t - surp_{d,k}^t \quad k \in K, d \in D, t \in T$$

**Demanda distribuidores:**

$$D_{f,k,i}^t - f_{f,k,i}^t = falt_{f,k}^t - surp_{f,k}^t \quad k \in K, f \in F, t \in T, i \in C$$

**Demanda exportaciones:**

$$D_{s,k}^t - \sum_{v=1}^{t-1} \sum_{i \in C} e_{s,k,i}^{v,t} = falt_{s,k}^t - surp_{s,k}^t \quad k \in K, s \in R, t \in T$$

(14)

**Cotas de variables:**

Las variables se encuentran definidas de la siguiente manera:

$$uz_{m,i}^{j,v} \geq 0 \text{ y entera. } uz_{m,i}^{j,v} \geq 0 \text{ y entera.}$$

Las demás variables se definen como mayores o iguales a 0.

#### 4. Métodos de Solución

La imposibilidad para obtener soluciones exactas en tiempos razonables en instancias medias y grandes de optimización por medio del branch and bound del solver, precisó la necesidad de considerar un método de solución adicional que incluyera el uso de una meta-heurística. La meta-heurística considerada fue GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure), que ha mostrado su efectividad tanto en problemas de redes como en problemas combinatorios (Delorme et. al., 2004), (Nascimento et. al., 2010), (Hernández - Pérez et. al., 2009). Esta meta-heurística se construyó específicamente para la asignación de los camiones a los pedidos que se asocian al componente combinatorio del problema. GRASP es una meta-heurística que se compone de dos etapas la primera de construcción que sigue un procedimiento voraz y la segunda de búsqueda local, en cada una de las etapas se mantiene una solución factible del problema.



En el método de solución P1, presentado con antelación, se plantea la función objetivo y las restricciones considerando la totalidad de los elementos del problema. El modelo es ejecutado completamente en el solver comercial LINGO 10. El procedimiento de solución para instancias mayores P2 consta de dos etapas. En la etapa 1 (etapa Solver) se resuelve un problema relajado de P1 donde, tanto en la función objetivo como en las restricciones son eliminados los términos asociados a los vehículos y su correspondiente costo, específicamente, se eliminan los sumandos relacionados con el conjunto C y el índice  $i$ , modificando todas las restricciones, con excepción de aquellas relacionadas con la capacidad de almacenamiento del CD, la capacidad de almacenamiento de las zonas auxiliares, el volumen de producción, la inicialización de inventarios y la capacidad de manejo de producto. Por su parte, las restricciones numeradas de la 1 a la 4 fueron suprimidas del modelo. De esta manera se optimizan los flujos del problema capacitado. Los resultados derivados de la ejecución de LINGO (etapa 1) sirven de input de la etapa 2 (en la etapa GRASP los resultados entran como parámetros), la cual se centra en buscar una buena configuración de flota para satisfacer los requerimientos de flujo. Finalmente, el valor de la función objetivo resultante de la etapa 1 es consolidado con el valor de la función objetivo generado por GRASP. El mismo procedimiento aplica para el tiempo total de ejecución del problema.

Así como en P1 LINGO se encarga de validar la capacidad de los camiones utilizados, en P2, GRASP trabaja bajo las restricciones de peso, volumen y disponibilidad, es decir, que busca hacer coincidir el peso, el volumen y el tiempo de transporte de cada uno de los pedidos, con el peso, volumen y disponibilidad de los vehículos, al menor costo posible. En el caso de GRASP el número de camiones depende de las necesidades del sistema, sin embargo, la utilización de vehículos que no se encuentran establecidos comúnmente dentro de la flota es penalizada con un sobrecosto.

Después de utilizar los métodos de solución descritos en el problema planteado y de realizar análisis de sensibilidad, análisis estadísticos y análisis descriptivos se puede concluir lo siguiente:

- En cuanto al tiempo de ejecución, es claramente mayor el tiempo de ejecución promedio de LINGO en comparación con el tiempo de ejecución de LINGO+GRASP.
- En cuanto a la función objetivo, se lograron mejores resultados en las corridas de LINGO (método exacto) que en las corridas ejecutadas con LINGO+GRASP (meta-heurística)

## 5. Conclusiones

Este trabajo presentó una formulación para un problema entero mixto que contiene problemáticas asociadas a un centro de distribución operando en el contexto de una cadena de abastecimiento con condiciones reales. Para la solución del problema fueron empleados dos métodos diferentes. Un método exacto para instancias pequeñas que sirvió para realizar el análisis de sensibilidad y una combinación de un método exacto y una meta-heurística (GRASP), para instancias medianas y grandes. Los resultados en cuanto a tiempos de ejecución fueron satisfactorios, ya que una instancia práctica en una Compañía con un sistema similar al que se estudia en este trabajo, pudo ser planeada en menos de 10 minutos.

## Referencias

- Bartholdi, J.J., Gue, K.R.** (2000), Reducing labor costs in an Itl crossdocking terminal. *Operations Research*, Vol. 48, No. 6. pp. 823-832.
- Delorme X, Gandibleux X, Rodríguez J.** (2004), GRASP for set packing problems. *European Journal of Operational Research*, 153, pp. 564–580.
- Eskigun, E. Uzsoy, R., Preckel, P.V., Beaujon, G., Krishnan, S., Tew, J. D.** (2005). Outbound supply chain network design with mode selection, lead times and capacitated vehicle distribution centers. *European Journal of Operational Research*, 165. pp. 182–206.
- Fenga, Ch.W., Cheng, T. M., Wu, H.T.** (2004), Optimizing the schedule of dispatching RMC trucks through genetic algorithms. *Automation in Construction*, 13. pp. 327– 340.

- Hernandez-Perez H, Rodríguez-Martín I, Salazar-González JJ.** (2009), A hybrid GRASP/VND heuristic for the one-commodity pickup-and-delivery traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*, 36. pp. 1639 – 1645.
- Kim JU, Kim YD.** (2000), A Lagrangian relaxation approach to multi-period inventory/distribution planning. *Journal of the Operational Research Society*, 51. pp. 364-370.
- Mejía G, Castro E.** (2007), Optimización del proceso logístico en una empresa de colombiana de alimentos congelados y refrigerados.
- Miao, Z., Lim, A., Ma, H.** (2009), Truck dock assignment problem with operational time constraint within crossdocks. *European Journal of Operational Research*, 192. pp. 105–115.
- Nascimento M, Resende M, Toledo F.** (2010), GRASP heuristic with path-relinking for the multi-plant capacitated lot sizing problem. *European Journal of Operational Research*, 200. pp. 747–754.
- Popken D.** (1994), An algorithm for the multiattribute, multicommodity flow problem with freight consolidation and inventory cost. *Operations Research*, vol. 42, no. 2. pp. 274-286.
- Ross, A., Jayaraman, V.** (2008), An evaluation of new heuristics for the location of cross-docks distribution centers in supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 55. pp. 64–79.
- Stet, M.** (2007), Warehousing systems in distribution of goods. *Fascicle of Management and Technological Engineering*, Volume VI (XVI).
- Subramaniam G, Gosavi A.** (2004), Simulation-based optimization for material dispatching in a retailer network, pp. 1412 - 1417.
- Sung, C.S., Song, S.H.** (2003), Integrated service network design for a cross-docking supply chain network. *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 54, 12. pp. 1283- 1295.
- Tan KK, Tang KZ.** (2001), Vehicle dispatching system based on Taguchi-tuned fuzzy rules. Department of Electrical Engineering, National University of Singapore. *European Journal of Operational Research*, 128. pp. 545-557.
- Tsouros C, Satratzemi M.** (1996), Optimal solution of a total time distribution problem. *International Journal of Production Economics*, 45. pp. 473-478.
- Yu, W., Egbelu, P.J.** (2008), Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage. *European Journal of Operational Research*, 184. pp. 377–396.