

Resolución del problema de diseño de redes de producción-distribución internacionales para una empresa multinacional colombiana

Jairo R. Montoya Torres
jairo.montoya@unisabana.edu.co

Profesor asociado y director del programa de Administración de Mercadeo y Logística Internacionales, Escuela Internacional de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de la Sabana, Chía (Colombia). Doctor de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne, Francia.

Resumen

En este artículo de investigación se estudia el problema de diseño de la red de distribución para una empresa colombiana multinacional líder en el diseño, producción y comercialización de ropa, morrales, mochilas, bolsos, maletines y accesorios con presencia en 15 países y con más de 200 tiendas bajo la figura de franquicias en toda América Latina. Debido a la complejidad y tamaño del problema de diseño de la red de distribución, se propone un enfoque de solución en tres fases basado en la construcción y resolución de modelos de programación lineal binaria. La implementación de los modelos se realiza con base en datos reales de la empresa, lo cual permite proveer alternativas para la toma eficiente y racional de decisiones empresariales.

Palabras clave: *Diseño de red de distribución, producción-distribución, programación lineal, caso de estudio.*



Abstract

This paper studies the problem of supplying network design for a multinational Colombian company leader in designing, manufacturing and distributing clothes, knapsacks, backpacks, purses, briefcases and accessories, with more than 200 selling points in 15 countries. Because of the computational complexity and size of the supply network problem, this paper proposes a three-phase resolution approach based on the construction and resolution of linear programming models. Such approach is implemented using real-life data provided by the company under study, allowing the actual presentation of alternatives for an efficient and rational decision-making at the enterprise.

Keywords: *Network design, supply chain management, production/distribution, linear programming, case study.*

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el problema de diseño de la red de distribución ha ganado importancia debido a la gran competencia introducida por la globalización de los mercados desde finales de la década de 1990 (Thomas & Griffin, 1996). Las empresas están obligadas a mantener unos altos niveles de servicio al cliente, y al mismo tiempo están forzadas a reducir los costos y mantener los niveles de márgenes de ganancia. Una cadena de valor, o cadena de suministros, es una red de centros de producción y distribución que desarrollan las actividades de adquisición de materias primas, su transformación en materiales intermedios en productos finales, y la distribución de estos últimos a los consumidores. Tradicionalmente, las funciones de mercadeo, distribución, planeación, manufactura y compras a lo largo de la cadena de suministros han operado de forma independiente. Éstas han tenido sus propios objetivos, los cuales en muchas oportunidades son contradictorios. Sin embargo, se requiere un mecanismo a través del cual estas diferentes funciones empresariales puedan estar integradas. La gestión de la cadena de valor (*supply chain management*) es una estrategia que permite esta integración (Shapiro, 2000).

El diseño de la red de suministros o distribución consiste en determinar la localización óptima de instalaciones para una gestión eficiente y efectiva de la cadena de valor empresarial. Este problema es de importancia estratégica para la gerencia de operaciones en logística. La tarea de diseño de la red involucra la escogencia de instalaciones, como son plantas (centros de producción) y centros de distribución (CEDIs) que deben ser abiertos, y los flujos de producto a través de la red de tal forma que se logre satisfacer la demanda de la zona de consumo al mínimo costo posible. Este problema pertenece a las familias de problemas de producción-distribución y de localización-asignación de instalaciones (Altıparmak et al., 2009). Cuando las instalaciones tienen capacidad limitada de producción o de almacenamiento, la situación se conoce como un problema de localización-asignación capacitado.

En la literatura, varios trabajos han estudiado el problema de diseño de redes de producción-distribución (Abdinnour-Helm, 1999; Gen & Syarif,

2005; Nakatsu, 2005; Altıparmak et al., 2006; Gen et al., 2006; Lashine et al., 2006). Modelos de programación matemática han demostrado ser de gran utilidad como herramientas de toma de decisiones para la resolución de este tipo de problemas complejos. Entre algunos de los trabajos que se deben resaltar se incluyen el de Geoffroy y Graves (1974), quienes describen un problema de diseño de un sistema de distribución para múltiples productos. Con el enfoque de resolución basado en métodos de descomposición de Benders, este es probablemente uno de los primeros artículos que presenta de forma compresiva un modelo de programación lineal entera mixta para el diseño estratégico de una red de distribución. Posteriormente, una gran diversidad de modelos matemáticos determinísticos han sido propuestos (Aikens, 1985; Geoffroy & Powers, 1995; Goetschalckx et al., 2002; Yan et al., 2003; Amiri, 2004).

En este artículo se estudia el caso de una empresa multinacional colombiana líder en diseño, producción y comercialización de ropa, morrales, mochilas, bolsos, maletines y accesorios, con presencia en 15 países y con más de 200 tiendas bajo la figura de franquicias en toda América Latina. Por razones de confidencialidad, no es posible mencionar el nombre de la empresa. Tal como se describe más adelante, el objetivo es diseñar la red de distribución para China y Europa de forma que se minimice el costo. Por la complejidad del problema, debido al tamaño de la red, se propone un enfoque de resolución jerárquico en tres fases.

Este artículo está organizado de la siguiente forma. La sección 2 describe en detalle el caso de estudio y el problema de diseño de red de producción-distribución bajo estudio. La sección 3 presenta el enfoque de solución propuesto, el cual está basado en un procedimiento jerárquico para el diseño de la red de la empresa a través de la resolución de modelos de programación lineal. La sección 4 presenta los resultados de la implementación computacional con datos reales suministrados por la empresa. Finalmente, el artículo termina en la sección 5 con la presentación de las conclusiones y algunas perspectivas.

2. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La empresa considerada en este artículo es una multinacional colombiana líder en diseño, producción y comercialización de ropa, morrales, mochilas, bolsos, maletines y accesorios. Su presencia en 15 países y con más de 200 puntos de venta bajo la figura de franquicias en toda América Latina, confirman el éxito y aceptación de sus productos, cada uno de ellos fabricados bajo los más riguroso estándares de calidad, con materiales y tendencias siempre actuales, a la vanguardia de la moda mundial. Es una organización sólida que crece al ritmo acelerado del mundo, respondiendo a las necesidades de sus usuarios a través de una marca joven, dinámica y auténtica.

Fundada en 1987, la empresa inicia operaciones con la fabricación de artículos de cuero, llegando con estos productos a los mercados de Estados Unidos, Japón, Hong Kong, Inglaterra, Australia, Canadá, Singapur, México y las islas del Caribe. Un año más tarde, en 1988, nace la primera colección de maletines, morrales y accesorios que dieron origen a la marca bandera de esta empresa. En 1990, la marca lanza al mercado su primera colección de ropa deportiva, bajo el concepto *outdoor*.

Una década después, con la entrada del siglo XXI, la empresa refresca su imagen creando un símbolo para la marca y actualizando su logotipo. En estos últimos años, la estrategia de la compañía ha dado un giro importante en torno a la unión de sus unidades de negocio bajo el concepto del “viajero urbano”, creando productos que se complementan unos a otros.

2.1. Unidades de negocio

La empresa cuenta con tres unidades de negocio que abarcan la totalidad de su portafolio en el mercado y que le significan en cada temporada (dos temporadas comerciales al año) un total aproximado de 2000 referencias. De este total de referencias, entre el 20% y 30% cambia de temporada a temporada (es decir que aproximadamente cada año 600 referencias salen del portafolio para darle paso a nuevos desarrollos) y es más significativo

el cambio en el negocio de ropa, dado el nivel de innovación que exige el mercado.

La participación de cada unidad de negocio, dentro del total de unidades que se comercializan, se encuentra actualmente distribuida como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1.
Unidades de negocio y líneas de producto de la marca

UNIDADES DE NEGOCIO		
Maletines (36%)	Accesorios (37%)	Ropa (27%)
Bolsos, morrales, tulas, maletas de viaje, universitarios, ejecutivos, manos libres, body bags, morrales especializados	Billeteras y monederos, gorras y sombreros, koalas, guantes, bufandas, lentes de sol, relojes, fragancias, cinturones, llaveros, loncheras, multiusos	Chaquetas, camisetas, buzos, pantalones, jeans, pantalonetas, shorts, tops

2.2. Situación actual

Los últimos años de la empresa han venido acompañados de un constante dinamismo en ventas, que le ha permitido alcanzar crecimientos anuales de entre 30% y 35%. Estas tasas han generado un impacto substancial en los productos insignia de la marca, lo cual ha reducido paulatinamente el volumen de crecimiento de unidades demandadas entre los distintos canales de distribución, a lo largo del territorio colombiano. Ya se hace evidente la saturación del mercado nacional.

Ante esta inevitable realidad, la compañía ha emprendido una serie de estrategias con el propósito de re-dinamizar las ventas y expandir la presencia de su marca. Parte de esta estrategia ha consistido en ampliar sus líneas de producto, ingresar a un mayor número de países latinoamericanos, buscar alternativas de mercado en Europa y en Australia y Asia y un acompañamiento muy cercano a las franquicias, para promover la apertura de nuevos puntos de venta que permita alcanzar la meta de 900 tiendas al 2016.

En la búsqueda de mayores niveles de productividad, la empresa ha focalizado su *core-business* en el diseño, selección de materiales, distribución y comercialización del portafolio de productos, dejando un importante volumen de sus actividades de manufactura en manos de terceros. Se han subcontratado procesos de producción (costura) con compañías satélites en Colombia y la fabricación de producto terminado con proveedores en China, lo cual ha permitido resultados importantes en la reducción de costos.

El traslado de la operación hacia Oriente se ha llevado a cabo de forma paulatina, según los crecimientos en ventas de la compañía, alcanzando a la fecha una figuración del 60% del volumen total de unidades que se comercializan entre las distintas unidades de negocio (ropa, maletines y accesorios). Este nuevo esquema de operación ha sido soportado con la instalación de Centros de Distribución (CEDI) en Bogotá (incluye un CEDI en Zona Franca) y Panamá, desde donde se distribuye producto a un importante número de mercados, excluyendo únicamente a aquéllos con distribución directa desde China.

Actualmente el mercado interno colombiano es el mayor consumidor de productos de la compañía, con una participación en venta de unidades del 70%, concentrando el mayor volumen de operación en los CEDIs de Bogotá y Zona Franca. El CEDI de Panamá se ha convertido en la plataforma logística para abastecer los mercados en Centro América y el Caribe.

2.3. Definición del problema

La compañía ha fijado ambiciosas metas en ventas para el año 2016, sustentado en el crecimiento vertiginoso que ha venido experimentando durante los últimos 6 a 8 años (ver figura 1). Con estos nuevos objetivos ya planteados, la estrategia en distribución sugiere un reacomodo importante acorde con las nuevas expectativas de la firma, que no solo permitan soportar su crecimiento en ventas, sino que garanticen su eficiencia.

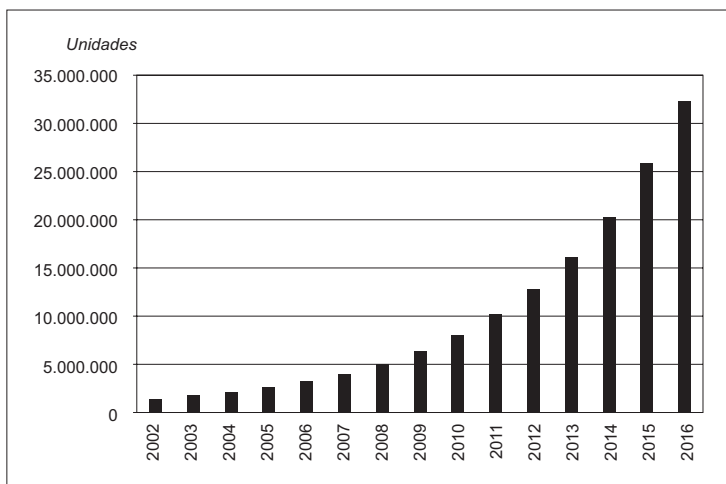


Figura 1. Proyección de ventas para el año 2016.

El primero de ellos sugiere que la participación en ventas debe dar un giro total, posicionando las ventas internacionales en un primer lugar, con un 70% de participación sobre las ventas totales de compañía. Esta primera situación requiere un traslado de la operación hacia algún punto estratégico que facilite el abastecimiento de los mercados internacionales. Otro punto importante que se debe considerar es el crecimiento en ventas en el mercado colombiano. El volumen de unidades en 2016 habrá crecido un 175% respecto al volumen actual, concentrando su crecimiento en las zonas norte y occidental del país, según consideraciones realizadas al mercado. Esta descentralización de las ventas nacionales sugiere la evaluación de establecer CEDIs secundarios en otras zonas del país con el propósito de minimizar costos de transporte.

Igualmente, las ventas internacionales pasarán de 1.5 millones a 22.4 millones de unidades anuales; con lo que la variedad de destinos incluirán mercados en Europa (España, Francia, Alemania y el Reino Unido) y Australia, así como otros mercados de América Latina que están en proceso de evaluación (Brasil, Argentina y Paraguay).

Para sobrellevar esta nueva demanda al año 2016, la compañía viene evaluando proveedores en otros países asiáticos (India y Tailandia), algunos europeos (Polonia y Rumania) así como la posibilidad de manufacturar

unidades en Brasil, para completar la capacidad de producción que se ha proyectado. Como parte de este trabajo práctico se pretende definir la localización de centros de producción y de almacenamiento que permitan abastecer eficientemente (al menor costo de transporte y almacenamiento) la demanda proyectada a 2016. Además de lo expuesto anteriormente, esto incluye la definición de los sitios en los cuales ubicar los centros de almacenamiento en China y en Europa.

3. PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN PROPUESTO

La situación que se va a modelar sugiere un complejo esquema de proveedores (CEPROs), centros de almacenamiento (CEDIs) y puntos de consumo, que interconectados proyectan la posible red de distribución de Nalsani S.A a 2016. La tabla 2 presenta el listado de puntos en la red de distribución, mientras que la figura 2 esquematiza la red de distribución bajo estudio.

Tabla 2.
Listado de puntos de la red de distribución

Países			
Región	Proveedores	Centros de almacenamiento	Puntos de consumo
China	Xiamen, Fuzhoun, Ningbo, Hong Kong, Taipei, Shanghai	CEDI por definir	-
India	Bombay	-	-
Tailandia	Bangkok	-	-
Centroamérica	-	Panamá	México, Costa Rica, Nicaragua, Guatemala, Panamá
Suramérica	Colombia, Brasil	Colombia, Brasil	Colombia, Venezuela, Brasil, Chile, Bolivia, Ecuador, Argentina
Europa	Rumania, Polonia	CEDI por definir	España, Alemania, Reino Unido, Francia
Australia			Australia

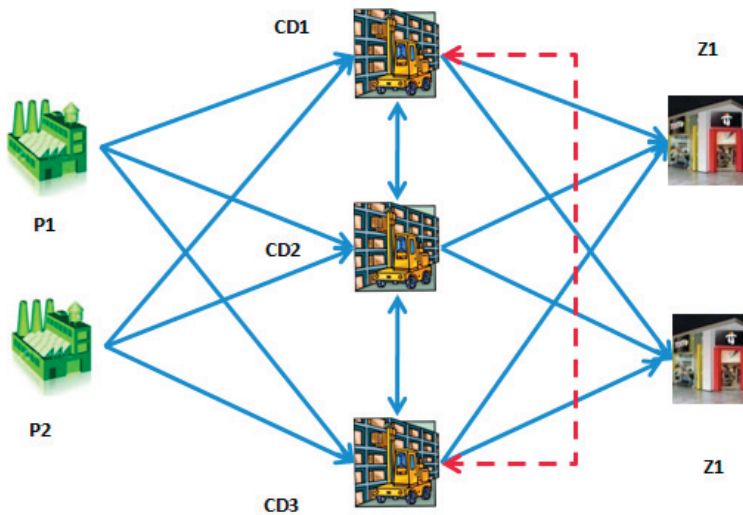


Figura 2. Esquema de la red de distribución

Como se estableció en el planteamiento del problema, el modelo debe entregar como respuesta la mejor red de abastecimiento y distribución para la compañía, estableciendo la ubicación de los centros de producción (CEPROs) y de los centros de almacenamiento (CEDIs) que deben hacer parte de esta red para satisfacer de forma óptima (a menor costo de transporte y almacenamiento) la demanda en cada uno de los puntos de consumo, aún si esto implica el cierre de instalaciones actualmente existentes o previamente establecidas.

Dada la complejidad de la red, la resolución de un modelo global para solucionar en un solo paso la configuración de la red requiere un alto consumo de recursos computacionales. Por lo tanto, se plantea un esquema de resolución jerárquico en tres fases (ver figura 3):

1. Localización óptima de un Centro de almacenamiento CEDI para China.
2. Selección de un proveedor y localización óptima de un centro de almacenamiento (CEDI) para Europa.

3. Definición de la red internacional óptima de abastecimiento y distribución.

En cada una de las fases se plantea un modelo de programación lineal binaria. Los modelos planteados en las fases I y II se resuelven de forma independiente. Las soluciones obtenidas en estas dos fases son incorporadas como datos para el desarrollo de la fase III.

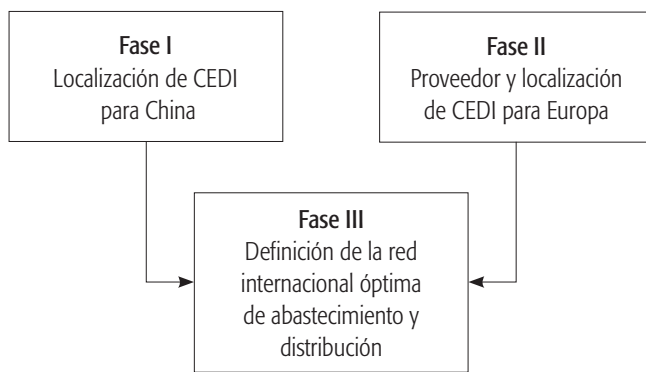


Figura 3. Esquema de resolución del problema

3.1. Fase I: Localización óptima de un CEDI para China

El modelo de programación binaria para encontrar la ciudad donde debe localizarse el centro de almacenamiento para China (ver figura 4) está basado en ciertas premisas. En primera instancia se establece que todos los centros de producción (CEPROs) deben despachar al centro de almacenamiento (CEDI) seleccionado y que se debe instalar un único CEDI en la zona al cual confluyan todos los orígenes (CEPRO). Es de notar que en este nivel de toma de decisiones definido para esta fase del procedimiento de solución, no se va a estipular la oferta a nivel de referencia de productos sino que se va a considerar en términos de capacidad total. De esta forma se considera un nivel estratégico-táctico para la toma de decisiones.

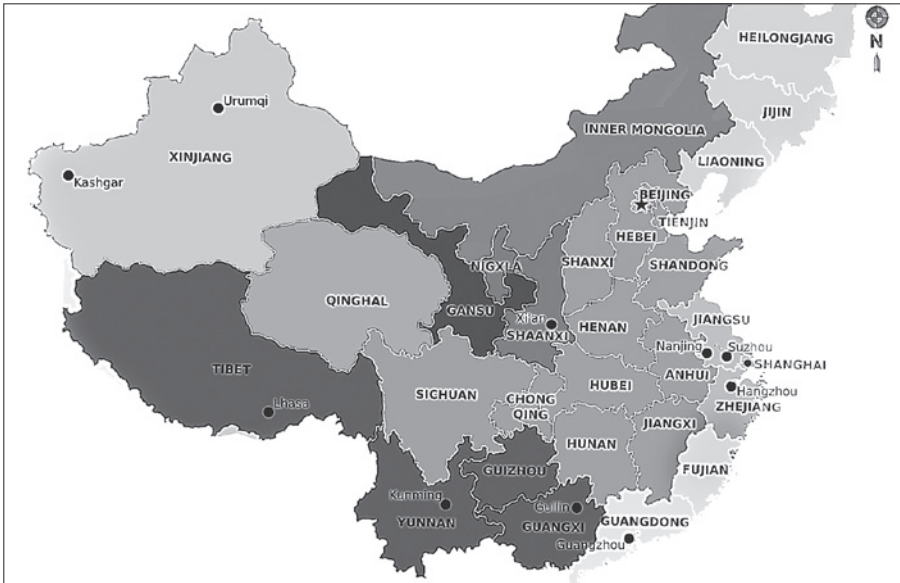


Figura 4. Mapa de China

Para este modelo de matemático se requiere definir la siguiente notación:

Subíndices	
i : Orígenes	$i = 1, \dots, I$
k : Destinos (CEDI)	$k = 1, \dots, K$
Variables de decisión	
$X_{ik} = 1$ si el origen i llega al CEDI k , 0 si no	
$Y_k = 1$ si el destino k es un CEDI, 0 si no	
Parámetros	
O_i : Oferta mínima de unidades del origen i	
O_{ik} : Costo unitario de transporte desde el origen i al CEDI k	
F_k : Costo anual fijo de mantenimiento del CEDI k	
G_k : Costo unitario de almacenamiento en el destino k	

El programa lineal binario es el siguiente:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K (O_i C_k G_k X_k) + \sum_{k=1}^K F_k Y_k \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^K Y_k \leq n \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K X_k = 1 \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (3)$$

$$Y_k \geq X_k \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (4)$$

$$X_k \in \{0,1\} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5)$$

$$Y_k \in \{0,1\} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (6)$$

La ecuación (1) corresponde a la función objetivo del modelo que consiste en la minimización del costo total. La restricción (2) corresponde al número máximo n de centros de almacenamiento que se deben abrir en la zona. Las ecuaciones (3) corresponden a la condición de que un punto de origen despacha a un único centro de almacenamiento. El conjunto de ecuaciones (4) significa que un el punto de producción (origen) abastece un centro de almacenamiento únicamente si éste es abierto. Finalmente, las restricciones (5) y (6) corresponden a los valores de las variables de decisión.

3.2. Fase II: Selección de proveedor y localización óptima de un CEDI para Europa

La segunda fase del procedimiento propuesto consiste en determinar cuál debe ser el proveedor para Europa y dónde debe estar ubicado el centro de almacenamiento. La figura 5 muestra un mapa de Europa El modelo

de programación lineal binaria para encontrar la solución a este problema considera que la oferta de cada centro de producción (proveedor u origen), CEPRO, satisface la suma total de la demanda en los puntos de consumo. Adicionalmente, el modelo debe establecer tanto un único proveedor como un único centro de almacenamiento (CEDI) en la zona. A este último deben confluir todos los orígenes y desde él deben abastecerse todos los destinos. Finalmente, el nivel de toma de decisiones sigue considerando los productos de forma agregada, tal que no se va a estipular la demanda a nivel de referencia, sino que se considera en términos de capacidad total.



Figura 4. Mapa de Europa.

Para este modelo de matemático se requiere definir la siguiente notación:

Subíndices	
i : Punto de origen	$i = 1, \dots, I$
j : Punto de consumo	$j = 1, \dots, J$
k : CEDI	$\forall k = 1, \dots, K$
Variables de decisión	
$X_{ijk} = 1$ si el producto sale del origen i hacia el destino j pasando por el CEDI k , 0 si no	
$Y_i = 1$ si el origen i es un CEPRO, 0 si no	
$Z_{ik} = 1$ si el CEPRO i abastece el CEDI k , 0 si no	
Parámetros	
CP_i : Costo de producción unitario en el origen i	
C_{ijk} : Costo unitario de transporte desde el punto de origen i hasta el destino j pasando por el CEDI k	
D_j : Demanda de unidades en el Punto de consumo j	
F_k : Costo anual fijo de mantenimiento del CEDI k	
G_k : Costo unitario de almacenamiento en el CEDI k	

La ecuación (7) corresponde a la función objetivo del modelo que consiste en la minimización del costo total. El conjunto de restricciones (8) establece que existe un único CEPRO que abastece un único CEDI. El conjunto de restricciones (9) asegura que todos los puntos de consumo sean abastecidos. Las restricciones (10) aseguran que cada punto de consumo sea abastecido por un CEDI que tiene esté abierto. De forma similar, el conjunto de restricciones (11) aseguran que todo CEDI sea abastecido por un CEPRO que sea efectivamente abierto. Finalmente, las restricciones (12), (13) y (14) corresponden a los valores binarios de las variables de decisión.

El programa lineal binario es el siguiente:

$$\min \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (C_{ijk} + G_k + CP_i) D_j X_{ijk} + \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K F_k Z_{ik} \quad (7)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K Z_{ik} = 1 \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, I \\ \forall k = 1, \dots, K \end{array} \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} \leq n \quad (9)$$

$$Z_{ik} \geq X_{ijk} \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, I \\ \forall k = 1, \dots, K \\ \forall j = 1, \dots, J \end{array} \quad (10)$$

$$Y_i \geq Z_{ik} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (11)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\} \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, I \\ \forall k = 1, \dots, K \\ \forall j = 1, \dots, J \end{array} \quad (12)$$

$$Y_i \in \{0,1\} \quad \forall i = 1, \dots, I \quad (13)$$

$$Z_{ik} \in \{0,1\} \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, I \\ \forall k = 1, \dots, K \end{array} \quad (14)$$

3.3. Fase III: Definición de la red internacional óptima de abastecimiento y distribución

En la tercera fase del procedimiento, una vez fijadas las ubicaciones en China y en Europa de los centros de almacenamiento, se desea determinar cuál es el flujo óptimo de unidades entre los diferentes nodos de la red. En esta fase, se propone un modelo de programación lineal entera, basado en las siguientes premisas. Se desea que el modelo establezca la cadena de abastecimiento y distribución óptima, indicando qué instala-

ciones (CEPROs y/o CEDIs) deben emplearse. Nuevamente, el nivel de toma de decisiones no considera el estudio de referencias sino que su alcance es definir capacidades totales. Adicionalmente, un punto de origen (proveedor) no puede abastecer directamente a un punto de consumo: el producto debe pasar por un CEDI primario. Este último es aquél que recibe producto directamente de un proveedor y en el cual se lleva a cabo el control de calidad al producto entregado por ese proveedor y puede abastecer directamente a un punto de consumo. Un CEDI secundario se define como aquél que recibe producto proveniente de un CEDI primario y abastece un punto de consumo.

Antes de presentar el modelo matemático es necesario considerar la siguiente notación:

Subíndices	
i : Punto de origen	$i = 1, \dots, I$
j : Punto de consumo	$j = 1, \dots, J$
k : CEDI	$k = 1, \dots, K$
a : CEDI primario	$a = 1, \dots, A$
t : Periodo	$t = 1, \dots, T$
Variables de decisión	
X_{ikt} : Cantidad de unidades despachadas desde el origen i hasta el CEDI k en el periodo t	
X_{akt} : Cantidad de unidades despachadas desde el CEDI a hasta el CEDI k en el periodo t	
X_{kjt} : Cantidad de unidades despachadas desde el CEDI k hasta el punto de consumo j en el periodo t	
X_{ajt} : Cantidad de unidades transportadas desde el CEDI primario a hasta el punto de consumo j en el periodo t	
X_{kat} : Cantidad de unidades despachadas desde el CEDI k hasta el CEDI a en el periodo t	
$Y_k = 1$ si el CEDI k pertenece a la cadena de distribución de la compañía, 0 si no	
$M_{it} = 1$ si el punto de origen i abastece unidades para el periodo t , 0 si no	
W_{kt} : Inventario final en el CEDI k para el periodo t	

Parámetros
C_{ik} : Costo unitario de transporte desde el punto de origen i hasta el CEDI k
C_{ak} : Costo unitario de transporte desde el CEDI a hasta el CEDI k
C_{kj} : Costo Unitario de transporte desde el CEDI k hasta el punto de consumo j
C_{ka} : Costo unitario de transporte desde el CEDI k hasta el CEDI a
D_{jt} : Demanda en el punto de consumo j para el periodo t
S_i : Oferta mínima en el punto de origen i
T_i : Oferta máxima en el punto de origen i
G_k : Costo unitario de almacenamiento en el CEDI k
U_k : Capacidad máxima de almacenamiento en el CEDI k
V_k : Capacidad mínima de almacenamiento en el CEDI k
CP_i : Costo unitario de producción en el origen i
F_k : Costo fijo anual de mantenimiento del CEDI k

El programa lineal binario es el siguiente:

$$\min \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (CP_i + C_{ik}) X_{ikt} + \sum_{a=1}^A \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T C_{ak} X_{akt} \right. \\ \left. + \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T C_{kj} X_{kjt} + \sum_{k=1}^K F_k Y_k + \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T G_k W_{kt} \right] \quad (15)$$

Sujeto a:

$$\sum_{k=1}^K X_{ikt} \leq T_i M_i \quad \forall i = 1, \dots, I \\ \forall t = 1, \dots, T \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{ikt} \geq S_i M_i \quad \forall i = 1, \dots, I \\ \forall t = 1, \dots, T \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{kjt} = D_{jt} \quad \forall j = 1, \dots, J \\ \forall t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$W_{k(t-1)} + \sum_{i=1}^I X_{ikt} + \sum_{a=1}^A X_{akt} \leq U_k Y_k \quad \begin{array}{l} \forall k = 1, \dots, K \\ \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (19)$$

$$W_{k(t-1)} + \sum_{i=1}^I X_{ikt} + \sum_{a=1}^A X_{akt} \geq V_k Y_k \quad \begin{array}{l} \forall k = 1, \dots, K \\ \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (20)$$

$$W_{k(t-1)} + \sum_{i=1}^I X_{ikt} + \sum_{a=1}^A X_{akt} \geq \sum_{j=1}^J X_{kjt} + \sum_{a=1}^A X_{kat} \quad \begin{array}{l} \forall k = 1, \dots, K \\ \forall t = 1, \dots, T \\ k \neq a \end{array} \quad (21)$$

$$W_{kt} + \sum_{j=1}^J X_{kjt} + \sum_{a=1}^A X_{kat} \geq W_{k(t-1)} + \sum_{i=1}^I X_{ikt} - \sum_{a=1}^A X_{akt} \quad \begin{array}{l} \forall k = 1, \dots, K \\ \forall t = 1, \dots, T \\ k \neq a \end{array} \quad (22)$$

$$\sum_{a=1}^A X_{akt} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{a=1}^A X_{iat} + \sum_{a=1}^A W_{a(t-1)} \quad \begin{array}{l} \forall k = 1, \dots, K \\ \forall t = 1, \dots, T \\ k \neq a \end{array} \quad (23)$$

$$\sum_{a=1}^A X_{kat} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{a=1}^A X_{iat} + \sum_{k=1}^K W_{k(t-1)} \quad \begin{array}{l} \forall t = 1, \dots, T \\ k \neq a \end{array} \quad (24)$$

$$\sum_{a=1}^A X_{kat} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{a=1}^A X_{ikt} + \sum_{k=1}^K W_{k(t-1)} \quad \begin{array}{l} \forall t = 1, \dots, T \\ k \neq a \end{array} \quad (25)$$

$$X_{akt} = X_{kat} \quad \begin{array}{l} \forall k = 1, \dots, K \\ \forall t = 1, \dots, T \\ \forall a = 1, \dots, A \\ k \neq a \end{array} \quad (26)$$

$$\sum_{k=1}^K Y_k \leq n \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^I M_{it} \leq m \quad \forall t = 1, \dots, T \quad (28)$$

$$X_{ikt} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, I \\ \forall k = 1, \dots, K \\ \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (29)$$

$$X_{akt} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall a = 1, \dots, A \\ \forall k = 1, \dots, K \\ \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (30)$$

$$X_{kjt} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall k = 1, \dots, K \\ \forall j = 1, \dots, J \\ \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (31)$$

$$X_{ajt} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall a = 1, \dots, A \\ \forall j = 1, \dots, J \\ \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (32)$$

$$X_{kat} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall k = 1, \dots, K \\ \forall a = 1, \dots, A \\ \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (33)$$

$$W_{kt} \geq 0 \quad \begin{array}{l} \forall k = 1, \dots, K \\ \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (34)$$

$$Y_k \in \{0,1\} \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (35)$$

$$M_{it} \in \{0,1\} \quad \begin{array}{l} \forall i = 1, \dots, I \\ \forall t = 1, \dots, T \end{array} \quad (36)$$

Las restricciones (16) corresponden a la oferta máxima mensual en cada origen para cada periodo. Las restricciones (17) corresponden a la oferta mínima en cada origen en cada periodo. El conjunto de restricciones (18) representa la demanda en los puntos de consumo. Las restricciones (19) y (20) corresponden, respectivamente, a las capacidades máxima y mínima en cada CEDI. La restricción (21) es una ecuación de balance de inventario en cada CEDI. Las restricciones (22) son ecuaciones que permiten calcular el inventario final en cada CEDI. El conjunto de restricciones (23) corresponde al balance del inventario de producto que entra y sale de un CEDI. Las restricciones (24) corresponden al balance de inventario de producto que sale desde un CEDI hacia otro CEDI. Las restricciones (26) representan ecuaciones de balance: lo que sale del CEDI a hacia el CEDI k es igual a lo que recibe el CEDI k desde el CEDI a . Las restricciones (27) y (28) corresponden respectivamente al número máximo n de CEDIs y al número máximo m de CEPROs que admite la cadena. Los conjuntos de

restricciones (29) a (36) corresponden a los valores admisibles para las variables de decisión.

4. IMPLEMENTACIÓN

El procedimiento de resolución propuesto para el diseño de la red de distribución de la empresa fue implementado utilizando datos reales suministrados por ésta. La resolución se llevó a cabo utilizando el Solver de Excel®. Los modelos se corrieron en un PC bi-procesador Pentium® Dual 1.73 GHz y 1.99 GB de RAM. Bajo esta configuración, el tiempo de cálculo no fue superior a 5 minutos para los modelos de las fases I y II, y 10 minutos para la tercera fase. El objetivo de haber utilizado Excel es permitir a la empresa reutilizar los modelos regularmente sin necesidad de imponer la adquisición de *software* especializado.

Las regiones a nivel mundial en las cuales se producen productos, se almacenan y se distribuyen al mercado de consumo final corresponden a las regiones que se mostraron en la tabla 2. Como se mencionó en la sección 2, el objetivo es determinar dónde debe quedar ubicado el centro de almacenamiento para China y para Europa, y con base en esta decisión, determinar los flujos de producto entre los diferentes nodos de la red de distribución, tal como se muestra en la figura 2.

A continuación se presentan los datos necesarios para implementar los modelos de cada una de las fases del procedimiento. Para la fase I, se requiere determinar los costos unitarios de transporte, así como la oferta mínima por punto de origen, y los costos de almacenamiento y de mantenimiento de los puntos de producción (proveedores), tal como lo muestran las tablas 3 y 4. Al aplicar el modelo matemático, se obtiene que debe abrirse el CEDI en la ciudad de Ningbo, lo cual genera un costo de \$34.293. De esta forma, los productos provenientes de las otras ciudades deben enviarse a este centro de almacenamiento, por lo cual las correspondientes variables de decisión van a tomar valores de 1: deben enviarse 1720 unidades desde Xiamen, 1400 unidades desde Fuzhoun, 3200 unidades desde Ningbo, 2200 desde Hong Kong y 1260 unidades desde Shanghai. El costo óptimo total de transporte y almacenamiento es de \$37.333,82.

Tabla 3.
Costo unitario de transporte

Origen / Destino	Xiamen	Fuzhoun	Ningbo	Hong Kong	Shanghai
Xiamen	\$ 0,01	\$ 0,18	\$ 0,34	\$ 0,27	\$ 0,38
Fuzhoun	\$ 0,18	\$ 0,00	\$ 0,25	\$ 0,33	\$ 0,35
Ningbo	\$ 0,34	\$ 0,25	\$ 0,00	\$ 0,41	\$ 0,21
Hong Kong	\$ 0,27	\$ 0,33	\$ 0,41	\$ 0,01	\$ 0,44
Shanghai	\$ 0,38	\$ 0,35	\$ 0,21	\$ 0,44	\$ 0,01

Tabla 4.
Datos adicionales para la Fase I

Oferta mínima por punto de origen (miles de unidades)		Costo promedio unitario de almacenamiento (US\$)		Costo fijo de mantenimiento (US\$)	
Proveedor	Oferta	CEDI	Oferta	CEDI	Costo mensual
Xiamen	1720	Xiamen	0,116	Xiamen	\$ 2.875
Fuzhoun	1400	Fuzhoun	0,124	Fuzhoun	\$ 3.220
Ningbo	3200	Ningbo	0,095	Ningbo	\$ 2.858
Hong Kong	2200	Hong Kong	0,104	Hong Kong	\$ 2.852
Shanghai	1260	Shanghai	0,083	Shanghai	\$ 3.013
Total Oferta	9780				

Para la segunda fase del procedimiento, el modelo matemático requiere de información similar para la región Europa. Las tablas 5 y 6 presentan los datos requeridos para ejecutar el modelo. La solución del modelo determina que el centro de producción de origen es Rumania. Por lo cual los flujos de producto deben salir de este centro de producción. El modelo también da como solución que el centro de producción de Rumania debe abastecer a Alemania. Ahora bien, con la tercera variable de decisión se determina que 1250 unidades deben ir desde Rumania hacia Alemania a través de España, 1140 unidades pasan directamente de Rumania a Alemania, 1180 unidades deben pasar por intermedio del Reino Unido, y finalmente 1230 unidades van de Rumania a Alemania a través de Francia.

Tabla 5.
Datos para la ejecución de la fase II

Costo Promedio Unitario de Producción (US\$)	
Polonia	\$ 2,50
Rumania	\$ 2,48
Demanda en el Punto de Consumo (miles de unidades)	
Destino	Unidades
España	1250
Francia	1230
Reino Unido	1180
Alemania	1140
Total Demanda	4800

Tabla 6.
Costos para los Centros de almacenamiento en Europa

Costo Promedio Unitario de Almacenamiento (US\$)		Costo fijo de mantenimiento (US\$)	
Polonia	\$ 0,18	Polonia	\$ 1.950
Rumania	\$ 0,21	Rumania	\$ 2.100
España	\$ 0,20	España	\$ 2.050
Alemania	\$ 0,18	Alemania	\$ 1.890
Reino Unido	\$ 0,23	Reino Unido	\$ 2.130
Francia	\$ 0,23	Francia	\$ 2.120

En la fase III del procedimiento, una vez determinado que los puntos en Ningbo y en Rumania, se determinan las rutas internacionales tomando en cuenta la globalidad de la red de distribución. Para esto es necesario recuperar información acerca de los costos de transporte, de manutención, la demanda del mercado, las capacidades de producción y almacenamiento (oferta), etc. La tabla 7 presenta los datos requeridos correspondientes a los costos de transporte. Los otros datos correspondientes a capacidad de oferta pueden obtenerse de las tablas anteriores. De otra parte, es necesario proyectar la demanda anual para cada una de las zonas de consumo y para cada periodo de tiempo analizado (anualmente hasta el año 2016

según el plan de desarrollo de la empresa). Por razones de confidencialidad no es posible mostrar los valores exactos de dichas proyecciones de demanda. Así mismo, tampoco es posible mostrar la solución obtenida para el costo global de la red de distribución dado por la solución óptima, ni los flujos determinados.

Tabla 7.
Costos de transporte

Punto de Origen / CEDI Primario	Alemania	Ningbo	Colombia	Brasil
Rumani	0,183	100	1,958	1,712
Xíamen	2,017	0,343	1,632	2,451
Fuzhoun	2,123	0,245	1,655	2,412
Ningbo	1,987	0,004	1,641	2,385
Hong Kong	1,995	0,412	1,561	2,587
Shanghai	2,034	0,206	1,629	2,121
Bombay – Mumbai	2,196	1,188	2,317	2,689
Bangkok	2,009	0,996	2,239	2,966
Brasil	100	100	0,914	0,012
Colombia	100	100	0,016	0,914
CEDI Primario / CEDI Secundario	Alemania	Panamá	Colombia	Brasil
Alemania		2,01	2,015	1,875
Ningbo	0,987	1,012	1,018	1,175
Colombia	2,015	0,471		0,518
Brasil	1,875	0,697	0,518	

CEDI / Zona de Consumo	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5
Alemania	0,305	2,455	2,213	2,138	2,104
Ningbo	1,075	0,813	1,107	1,174	1,308
Hong Kong	1,051	0,706	1,145	1,174	1,332
Colombia	2,193	2,487	0,588	0,216	0,609
Brasil	2,006	2,455	0,722	0,612	0,381
Panamá	1,924	2,214	0,319	0,487	0,615

5. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

El diseño de una red de distribución consiste en determinar la localización óptima de instalaciones para una gestión eficiente y efectiva de la cadena de valor empresarial. Este problema es de importancia estratégica para la gerencia de operaciones logísticas. El objetivo es determinar qué centros de producción y de distribución deben ser abiertos y dónde, y cuál es el flujo de producto a través de la red de tal forma que se logre satisfacer la demanda de la zona de consumo al mínimo costo posible. Este problema pertenece a las familias de problemas de producción-distribución y de localización-asignación de instalaciones. En este artículo se estudió el caso de una empresa multinacional colombiana líder en diseño, producción y comercialización de ropa, morrales, mochilas, bolsos, maletines y accesorios con presencia en 15 países y con más de 200 tiendas bajo la figura de franquicias en toda América Latina. El objetivo del trabajo presentado fue diseñar la red de distribución para las regiones de China y de Europa, y posteriormente determinar el flujo global internacional al mínimo costo. Debido a la complejidad del problema dada por el tamaño de la red, se propuso un enfoque de resolución jerárquico en tres fases. La metodología propuesta estaba basada en la resolución de modelos de programación lineal que apoyan el proceso de toma de decisiones estratégicas para la empresa. Se utilizaron datos reales suministrados por la empresa. Los resultados de la implementación permitieron determinar el sitio más adecuado para localizar los centros de producción y de distribución en las regiones determinadas, logrando satisfacer las necesidades del mercado proyectadas en el plan de desarrollo de la empresa para el año 2016.

Con el fin de soportar el proceso de toma de decisiones gerenciales, los modelos fueron desarrollados en Excel®. De esta forma, es posible emplearlos nuevamente en un futuro actualizando la información pertinente sobre los costos de transporte entre los puntos de la red, los costos de mantenimiento de las instalaciones, la demanda y sus respectivas capacidades. Si bien podría pensarse que el gran tamaño de la red resultaría prohibitivo para la aplicación de modelos matemáticos, los resultados de la implementación en la empresa mostraron que los modelos propuestos pueden aplicarse de forma estratégica en la toma de decisiones. Para agi-

lizar aún más el proceso de cálculo, a futuro pueden implementarse otros procedimientos de carácter heurístico. Por otro lado, puesto que los modelos fueron diseñados para un nivel de toma de decisiones estratégico, el paso siguiente es traducir las soluciones obtenidas para los niveles táctico y posteriormente operativo. Esto requerirá la desagregación de ciertos datos y el cálculo de parámetros.

Agradecimientos

El autor desea agradecer la colaboración de Jairo Velazco, Luis Vargas y Juan J. Aldaz, estudiantes del programa de Especialización en Gerencia Logística de la Universidad de La Sabana, en la identificación del problema en la empresa y en la consecución de la información.

Referencias

- Abdinnour-Helm, S. (1999). Network design in supply chain management. *International Journal of Agile Management Systems*, 1 (2), pp. 99-106.
- Aikens, C.H. (1985). Facility location models for distributing planning. *European Journal of Operational Research*, 22 (3), pp. 263-279.
- Altıparmak, F., Gen, M. & Lin, L. (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computer and Industrial Engineering*, 51, pp. 196-215.
- Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L. & Karaoglan, I. (2009). A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design. *Computers and Industrial Engineering*, 56, pp. 521-537.
- Amiri, A. (2006). Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. *European Journal of Operational Research*, 171 (2), pp. 567-576.
- Gen, M., Altıparmak, F. & Lin, L. (2006). A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding. *OR Spectrum*, 28 (3), 337-354.
- Gen, M. & Syarif (2005). Hybrid genetic algorithm for multi-time period production/ distribution planning. *Computers and Industrial Engineering*, 48, (4), 799-809.
- Geoffrion, A.M. & Graves, G.W. (1974). Multi-commodity distribution system design by benders decomposition. *Management Science*, 20, 822-844.

- Geoffrion, A. M. & R.F. Powers (1995) Twenty years of strategic distribution system design: An evolution perspective. *Interfaces*, 25, 105-128.
- Goetschalckx, M., C.J. Vidal & K. Dogan (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143, 1-18.
- Lashine, S.H., M. Fattouh & A. Issa (2006). Location/allocation and routing decisions in supply chain network design. *Journal of Modelling Management*, 1 (2), 173-183.
- Nakatsu, R.T. (2005). Designing business logistics networks using model-based reasoning and heuristic-based searching. *Expert Systems with Applications*, 29 (4), 735-745.
- Shapiro, J. (2000). *Modeling the supply chain*. Pacific Grover (USA): Duxbury Press. USA.
- Thomas, D.J. & P.M. Griffin (1996). Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 94, 1-115.
- Yan, H., Z. Yu & T.C. Cheng (2003). A strategic model for supply chain design with logical constraints: Formulation and solution. *Computers & Operations Research*, 30, 2135-2155.