

**UNIVERSIDAD CENTRAL “MARTA ABREU” DE LAS VILLAS  
FACULTAD DE INGENIERIA INDUSTRIAL Y TURISMO  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



## **TRABAJO DE DIPLOMA**

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA EL DISEÑO DE CADENAS DE  
SUMINISTRO DIRECTAS BAJO RESTRICCIONES FINANCIERAS**

**AUTORA: Isairis Posada Alberto**

**TUTOR: Dr.C Ing. Yasel Costa Salas  
Ing. Kenia Bonilla Pérez**

**CONSULTANTE: Ing. Frank Piedra Jiménez**

**Santa Clara  
2014**

Dedicado a Clotilde Alberto y Julio Posada porque sin su constancia, dedicación, aliento, sacrificio y amor no hubiese sido posible llegar hasta aquí.

## Agradecimientos

A mi enorme familia que me ha sostenido y estado siempre pendientes de mí, gracias por su consejo y cariño.

A mis tutores Kenia Bonilla, Frank Piedra y Yasel Costa, gracias por su dedicación y colaboración en este paso importante de mi vida.

A mis amigos que nunca me han soltado la mano y han estado disponibles para ayudarme, gracias por formar parte de la familia que se escogí.

A mi novio, gracias por estar a mi lado y ayudarme a transitar el camino aunque no siempre esté visible.

A todos los que de una forma u otra fueron partícipes de esta travesía, gracias.

## **RESUMEN**

En la presente investigación se desarrolla un modelo para optimizar el diseño de cadenas de suministro directas bajo restricciones financieras, abordando el capital de trabajo como aspecto financiero; como respuesta al problema científico ¿Cómo optimizar el diseño de cadenas de suministro directas teniendo en cuenta simultáneamente el flujo material y algunas consideraciones del flujo financiero? El modelo propuesto constituye un aporte a las escasas investigaciones encontradas y analizadas en la construcción del marco teórico referencial, al tener en cuenta el flujo financiero más allá del análisis de sensibilidad de algunos parámetros. Los resultados principales obtenidos fueron: elaboración de un modelo de optimización para el diseño de cadenas de suministro directa que incluye el capital de trabajo como restricción financiera, aplicación parcial del modelo a un caso de estudio que logra diseñar una cadena de suministro de tres eslabones que permite maximizar los beneficios y tomar decisiones como cantidad y ubicación de instalaciones, penalizando a la función objetivo por demanda insatisfecha de los clientes. Todo lo anterior permitió comprobar la hipótesis general de investigación planteada.

## **ABSTRAC**

In the present investigation a model is developed to optimize the design of direct supply chains under financial restrictions, approaching the working capital as financial aspect; as answer to the scientific problem How to optimize the design of direct supply chains keeping simultaneously in mind the material flow and some considerations of the financial flow? The proposed pattern constitutes a contribution to the scarce opposing investigations and analyzed in the construction of the mark theoretical referencial, when keeping in mind the financial flow beyond the analysis of sensibility of some parameters. The main results obtained were: elaboration of a optimization model for the design of direct supply chains that includes the working capital as financial restriction, partial application of the pattern to a case of study that is able to design a supply chain of three links that it allows to maximize the benefits and to take decisions like quantity and location of facilities, penalizing to the objective function for the clients' unsatisfied demand. All the above-mentioned allowed to check the general hypothesis of outlined investigation.

## Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I. MARCO TEORICO REFERENCIAL.....	4
1.1.    Introducción.....	4
1.2.    Cadena de Suministro. Definiciones.....	4
1.3.    Decisiones dentro de la cadena de suministro.....	6
1.4.    Modelos y métodos de optimización.....	8
1.6.    El problema del diseño de cadenas de suministro.....	12
1.7.    Modelos de optimización de cadenas de suministro considerando aspectos financieros.....	21
1.7.    Conclusiones parciales.....	23
CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO DE CADENAS DE SUMINISTRO DIRECTAS BAJO RESTRICCIONES FINANCIERAS.....	24
2.1.    Introducción.....	24
2.2.    Descripción del procedimiento general.....	24
2.3.    Fase I: Modelación genérica de la cadena de suministro.....	24
2.3.1.    Identificación del esquema general de la cadena de suministro.....	24
2.3.2.    Modelo de optimización matemático.....	25
2.3.    Fase II: Decisión final.....	31
2.4.    Conclusiones parciales.....	32
CAPÍTULO III APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DIRECTA TENIENDO EN CUENTA EL CAPITAL DE TRABAJO EN UN CASO DE ESTUDIO.....	33
3.1    Introducción.....	33
3.2.    Fase I: Modelación de la cadena de suministro.....	33
3.2.1.    Identificación del esquema de la cadena de suministro.....	33
3.2.2.    Modelo de optimización matemático.....	33
3.3.    Fase II: Decisión final.....	44
3.3.1.    Solución óptima sin considerar capital de trabajo.....	44

3.3.2 Solución óptima considerando capital de trabajo.....	45
3.4. Conclusiones parciales.....	46
Conclusiones Generales.....	48
Recomendaciones.....	49
Bibliografía.....	50

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos tiempos rápidos cambios se han producido en el entorno empresarial. La competencia entre las empresas en todas sus funciones operativas, desde la materia prima hasta servicio al cliente, se ha incrementado dramáticamente. Las empresas se han visto obligadas a gestionar sus operaciones durante el marco limitado "única empresa" (Spekman et al , 1998). Estos acontecimientos han conducido a la evolución de la "gestión de la cadena de suministro" (SCM) ya que las empresas se han dado cuenta de que no puede operar individualmente más, sino sólo como partes de un complicada cadena de operaciones comerciales (Tan et al., 1998)

Las organizaciones, constituyen una red que conforma una cadena de suministro, las cuales interactúan a través de conexiones continuas e inversa para añadir valor a los productos (Mentzer et al., 2001). Esta red la componen eslabones y etapas, donde sus principales operaciones involucran compra de materias primas a proveedores, la producción, transporte y almacenamiento de productos, gestión de inventario, y distribución de los productos a los clientes (Simchi-Levi et al., 2000).

Parte del proceso de planificación en la SCM tiene por objeto la búsqueda de la mejor manera posible de configuración de la cadena de suministro, en lo adelante SCN. Estas decisiones son consideradas estratégicas por su horizonte de largo tiempo y se abordan con modelos para la ubicación de las instalaciones. El problema de SCN se ha convertido recientemente en un área de gran interés, entre los académicos y los profesionales de la investigación de operaciones y en la comunidad ciencias de la gestión, ya que su contribución en el logro de los objetivos de negocio ha ganado universales reconocimiento.

Por lo tanto, un notable número de modelos matemáticos, con el objetivo de optimizar el diseño y el funcionamiento de SCN, se encuentran dispersos en la literatura existente. En la comunidad académica se han desarrollado varios modelos que describen el diseño y operación de cadenas de suministro. La mayor parte de los modelos de diseño SCN cubre un amplio espectro de aspectos de modelado, sin embargo su gran mayoría ignora las decisiones que implican ingresos , campañas de marketing , la cobertura contra incertidumbres, la planificación de inversiones, y otras decisiones financiera de las empresas ( Shapiro , 2004 ). La búsqueda bibliográfica realizada evidenció que las investigaciones sobre los modelos integrados de diseño de SCN que capturan los asuntos financieros está todavía en su infancia.

En cuanto a Cuba, la actividad logística de la última década ha recibido una considerable atención por parte de los círculos académicos nacionales, no siendo así por parte de las

empresas (Acevedo Suárez, 2000). Sin dudas lo anterior ha sido una problemática del sistema empresarial cubano que presenta una serie de debilidades, la mayoría de ellas fuertemente relacionadas con la gestión de la cadena de suministro y la toma de decisiones, a pesar de apuntar a diferentes direcciones o módulos del modelo de referencia utilizado. Todo lo anterior se evidencia en el estudio realizado por (Sáez Mosquera, 2009), este autor hace una caracterización del estado de la logística en Cuba en una muestra de 122 empresas, evaluando en un nivel medio su estado a partir de su reflejo en las estructuras de dirección, donde sólo el 56% de la muestra refleja la función logística en sus estructuras de dirección o la reconocen formalmente

Todo lo anterior describe en síntesis la **situación problemática** de la investigación, evidenciando que la optimización en el campo de la SCN, se ha tenido en cuenta escasamente la optimización financiera más allá del análisis de sensibilidad de algunos parámetros financieros.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el **problema científico** a resolver en el desarrollo de la presente investigación es: ¿Cómo optimizar el diseño de cadenas de suministro directas teniendo en cuenta simultáneamente el flujo material y algunas consideraciones del flujo financiero?

Derivada de la construcción del marco teórico referencial, se formuló como **hipótesis general** de la investigación la siguiente: El diseño y aplicación de un modelo de optimización para el diseño de cadenas de suministro directa bajo restricciones financieras, permite obtener la solución óptima del diseño de la cadena de suministro teniendo en cuenta simultáneamente el flujo material y algunas consideraciones del flujo financiero.

Esta hipótesis quedará comprobada si, en primer lugar, se demuestra la factibilidad de aplicación del modelo en un caso de estudio. Una vez definido el problema científico así como la hipótesis investigativa correspondiente, el objeto de estudio teórico lo constituye el diseño de cadenas de suministro. Se tomó como objeto de estudio práctico, un caso de estudio.

En conformidad con la hipótesis formulada, el **objetivo general** de la investigación consistió en diseñar un modelo para optimizar el diseño de cadenas de suministro directas teniendo en cuenta simultáneamente el flujo material y el capital de trabajo como aspecto financiero.

Este objetivo general fue desglosado en los **objetivos específicos** siguientes:

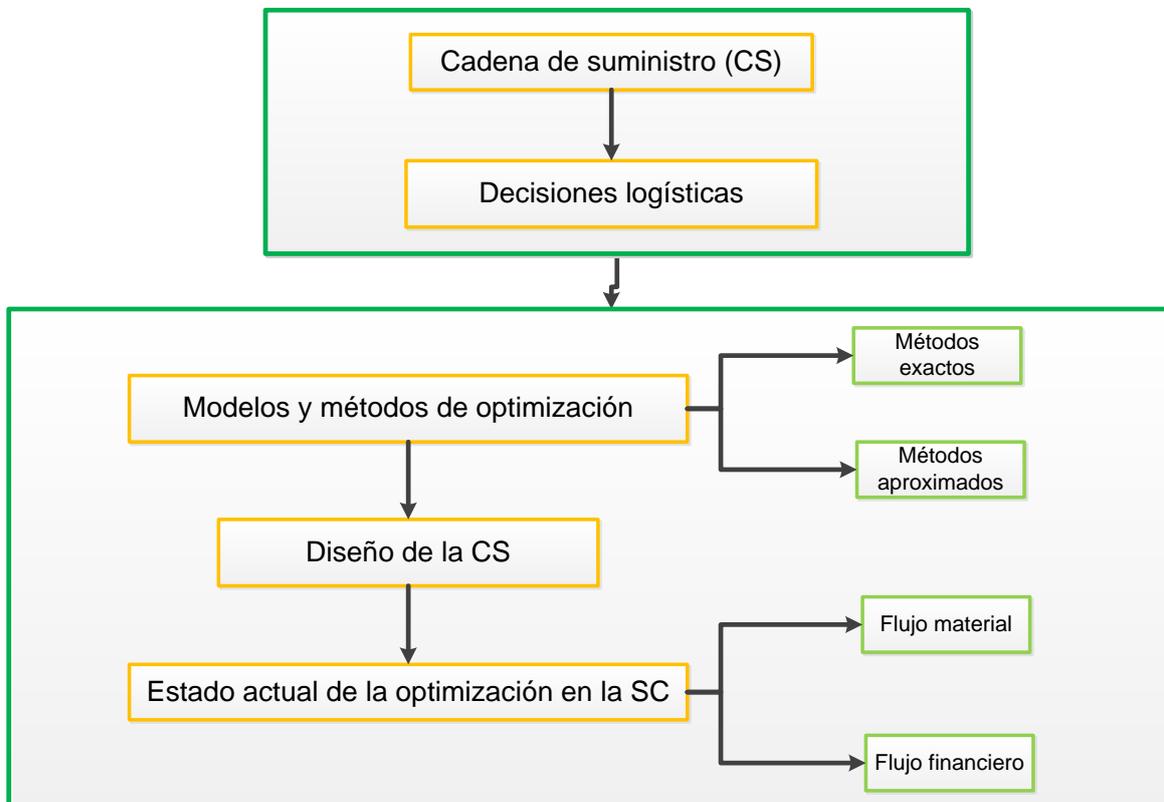
1. Evaluar el estado del conocimiento y de la práctica a partir de la revisión de la bibliografía relacionada con modelos de optimización para el diseño de cadenas de suministro.
2. Diseñar un procedimiento general para optimizar el diseño de cadenas de suministro teniendo en cuenta el flujo material y el capital de trabajo.
3. Aplicar el procedimiento a un caso de estudio, donde se diseñe un modelo de optimización para la cadena de suministro teniendo en cuenta restricciones asociadas al flujo material y el capital de trabajo como restricción financiera en dos de los tres eslabones de la cadena.

La presente investigación se estructura en tres capítulos: un capítulo I, donde se define el marco teórico referencial que sustenta la investigación; un capítulo II, en el cual se elaboró un procedimiento para optimizar el diseño de cadenas de suministros teniendo en cuenta el capital de trabajo en dos de los tres eslabones de la cadena; y un capítulo III, donde se comprueba la hipótesis general de investigación planteada aplicando el procedimiento a un caso de estudio. Además se incluyen las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación realizada y las referencias bibliográficas.

## CAPITULO I. MARCO TEORICO REFERENCIAL

### 1.1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo crear una base teórica-práctica para sustentar la investigación a realizar. Para dar cumplimiento a este objetivo se traza el hilo conductor del Marco Teórico Referencial que se muestra en la Figura 1.1. Para su construcción se han tenido en cuenta las consideraciones de diferentes autores partiendo de la definición de cadena de suministro, pasando por las decisiones logísticas considerando los flujos materiales, informativos y financieros. Esta investigación se sustenta sobre la base de la revisión de literatura especializada y actualizada para llegar a comprender el estado actual de la optimización de la cadena de suministro y los diferentes algoritmos de solución que existen.



**Figura 1.1. Hilo conductor del Marco Teórico Referencial.**

### 1.2. Cadena de Suministro. Definiciones

Definiciones, cada vez más precisas y modernas de la logística como ciencia, enfoques e incluso filosofías, han sido aportadas o divulgadas por diferentes instituciones y autores, como (Lalonde, 1971), (Bowersox, 1979), (Ballou, 2005), (Magee, 1960), (Blanchard, 1998), (Logística, 2003), entre otros. En prácticamente todas estas definiciones en mayor o menor grado, se coincide en fundamentar el enfoque en sistema de la logística y su marcada función de satisfacción al cliente y existencia de operaciones tales como

“...planificar, administrar y controlar el flujo de materias primas, productos semielaborados o terminados a lo largo de los procesos de abastecimiento, almacenamiento y distribución, desde el proveedor hasta el cliente final, incluyendo la información desde el lugar de origen hasta el lugar de consumo” (Marrero Delgado, 2001)

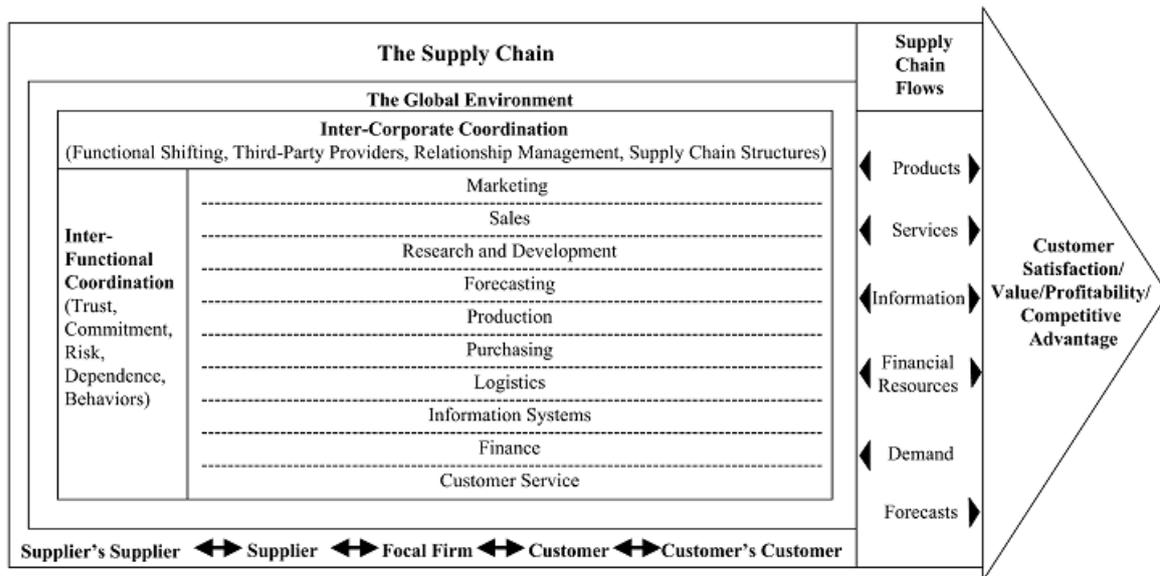
Un concepto de logística mucho más elaborado lo constituye el de Consejo de Profesionales de Gestión de Cadena de Suministro, de las siglas en inglés, CSCMP (CSCMP, 2014), el cual plantea que, “La logística es aquella parte de la SCM que planifica, implementa y controla el flujo hacia adelante e inverso eficiente y efectivo y el almacenaje de productos, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo para satisfacer los requisitos de los clientes”.

Como parte del proceso evolutivo del concepto de Logística, en algunas de sus definiciones se comienza a introducir el término de cadena de suministro. Autores como (Christopher, 1999), (Clarkston, 2000); (Mentzer, 2001) y (Acevedo Suárez, 2001), han definido en sus trabajos lo que es una cadena de suministros, resumiendo estas definiciones, el concepto de CS está dado por el conjunto o red de varias entidades en donde se conjugan una serie de procesos directamente involucrados en los flujos hacia arriba y hacia abajo (o hacia delante y hacia atrás) de productos, servicios, finanzas e información desde una fuente hasta un cliente.

En este ámbito la SCM, ha emergido en la actualidad como la nueva etapa en la gestión logística (LM) de las empresas como un grado superior de integración, lo cual constituye el eje central del desarrollo histórico de la logística, véase (Acevedo Suárez, 2001). De acuerdo con el Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP, 2014), que plantea que “La SCM abarca la planeación y gestión de todas las actividades involucradas en el abastecimiento y adquisición, conversión y todas las actividades de gestión de la logística. También incluye de manera importante la coordinación y colaboración con socios del mismo canal, quienes pueden ser suministradores, intermediarios, proveedores de servicios tercerizados, y clientes. En esencia, la SCM integra la gestión del suministro y la demanda dentro y a través de las compañías”.

Al respecto resulta de interés a la investigación el enfoque propuesto por (Mentzer, 2001), véase figura 1, donde propone un modelo que concibe a la SCM como procesos del ciclo de vida que comprende el flujo físico, el flujo de información, el flujo financiero y flujos de conocimiento cuyo propósito es satisfacer las necesidades de los usuarios finales con productos y servicios de múltiples proveedores vinculados.

Existen diferentes tipos de cadenas de suministro dentro de la logística: cadena directa, cadena inversa y cadena de ciclo cerrado.



**Figura 1.2. Modelo de SCM. Fuente: (Mentzer, 2001)**

La cadena de suministro directa comprenderá todos los procesos de negocios, recursos humanos, tecnología e infraestructura que permitan el flujo hacia delante (desde proveedores hacia clientes) tanto de materiales como de información, los cuales facilitarán la entrega al cliente final del producto (o servicio) demandado por el mismo. Por otra parte también se considera la existencia de la cadena inversa de suministro que se plantea la gestión de los productos y materiales devueltos por los clientes para su tratamiento adecuado, ya sea por el fabricante o el proveedor correspondiente. (Ros et al., 2003)

Cuando una misma cadena de suministro se encarga del flujo directo e inverso de sus productos es considerado una cadena de ciclo cerrado. (Ver figura 1.3)

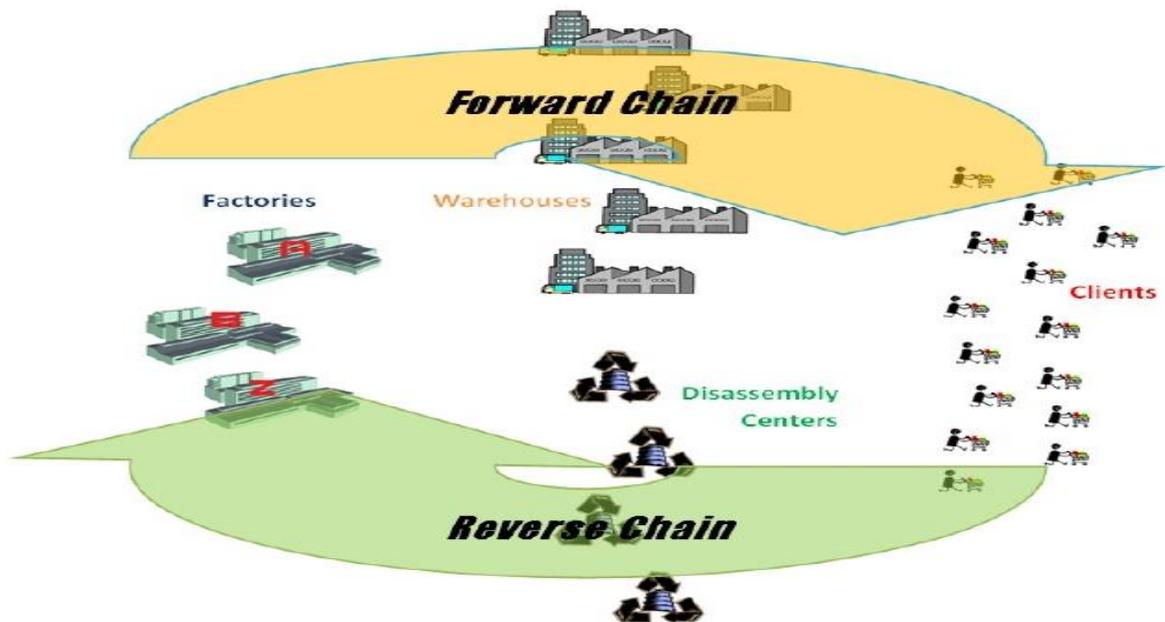
En una red cerrada no habrá puntos de entrada o salida, de productos o de material, distintos de los de la correspondiente cadena directa, es decir, los productos al final de su vida útil son devueltos por los clientes para su eliminación o reciclaje. (Mier, 2003)

Durante el funcionamiento de los sistemas logísticos enmarcados en las cadenas de suministro se debe lograr la toma oportuna y eficiente de decisiones, de acuerdo a los procedimientos establecidos para cada actividad. Estas son las llamadas decisiones logísticas, las cuales serán objeto de estudio en el siguiente epígrafe.

### **1.3. Decisiones dentro de la cadena de suministro**

En la cadena de suministro se toman diferentes decisiones logísticas donde los autores ((Ballou, 1991), (Knudsen González, 2005), (Arntzen et al., 1995), (Reza Zanjirani Farahani, 2014), (Ballou, 2004), (Standler H, 2008), (Vidal and Goetschalckx, 1997), (Schmidt, 2000), (Meyr et al., 2002) y (Sabri and Beamon, 2000)) coinciden en que

pueden clasificarse por su jerarquía en estratégicas, tácticas y operativas en función de la magnitud de la inversión a realizar, del horizonte temporal y la frecuencia de decisión. También coinciden en que el número, la ubicación, la capacidad de las instalaciones y la selección de proveedores son decisiones estratégicas. Las principales diferencias entre sus opiniones radican en lo relacionado con el inventario y el flujo y canales de transportación, que se pueden considerar en un nivel u otro en dependencia del propósito de la cadena de suministro.



**Figura 1.3. Cadena de suministro de ciclo cerrado. Fuente: (Esteves et al., 2012)**

(Ballou, 1991) y (Knudsen González, 2005) concuerdan con que las decisiones según el periodo de tiempo se consideran en: estratégicas que son a largo plazo y requieren de grandes inversiones; tácticas que son a mediano plazo y requieren de menor inversión; y operativas que son las del día a día que son de muy baja inversión.

Existe también otra forma de asociar las decisiones logísticas, específicamente por actividades, para (Ballou, 2004) se pueden subdividir en: niveles de servicio al cliente, ubicación de servicios, política de inventarios y selección de medios y rutas para el transporte. Mientras que otros como (Arntzen et al., 1995) han clasificado cuatro actividades importantes: localización, inventario, producción y transporte.

(Reza Zanjirani Farahani, 2014); (Ballou, 2004); (Standler H, 2008); (Vidal and Goetschalckx, 1997), (Schmidt, 2000), (Meyr et al., 2002) coinciden en que el diseño de la red es decir todo lo vinculado al número, capacidad, localización de los medios de la cadena de suministro, la selección de proveedores son decisiones que se toman a un nivel estratégico. (Schmidt, 2000), (Reza Zanjirani Farahani, 2014) consideran las

decisiones relacionadas con el inventario tácticas, mientras que (Sabri and Beamon, 2000) lo ven de forma operacional.

(Ballou, 2004) y (Reza Zanjirani Farahani, 2014) coinciden en que la planificación del transporte, la selección de las rutas y el modo de transporte son decisiones tácticas, difiriendo así con (Standler H, 2008), (Meyr et al., 2002) y (Schmidt, 2000) que plantean que la planificación del transporte es una decisión operativa.

La fijación del nivel de servicio al cliente es una decisión operativa según (Reza Zanjirani Farahani, 2014) pero (Ballou, 2004) la considera una decisión estratégica. (Standler H, 2008) y (Ballou, 2004) concuerdan en que la planificación de la demanda es una decisión táctica, mientras que este primero y (Reza Zanjirani Farahani, 2014) coinciden en que el cumplimiento de la demanda es una decisión operativa.

En esta investigación se considera la clasificación de las decisiones como se muestra en la tabla.1.1, donde se asocian el flujo material con la jerarquía de las decisiones. Toda decisión que se tome en cualquier parte de una cadena de suministro en relación con el flujo material lleva consigo una decisión financiera y genera a su vez una informativa.

En la actualidad por lo complejo y competitivo que se han vuelto los entornos donde conviven las organizaciones, no se concibe el proceso de toma de decisiones sin un soporte matemático robusto. Al respecto existen disímiles herramientas matemáticas para modelar y optimizar cadenas de suministro, que abarcan diferentes ramas del conocimiento como la investigación de operaciones, inteligencia artificial entre otras, las cuales serán objeto de estudio apartado siguiente.

#### **1.4. Modelos y métodos de optimización**

Las organizaciones necesitan que el proceso de toma de decisiones se realice en un tiempo racional y de forma óptima, es por ello que han surgido los modelos y métodos de optimización. De acuerdo con (Talbi, 2009) el proceso clásico de toma de decisiones incluye la formulación, modelación, optimización e implementación de la solución como se muestra en la figura 1.4.

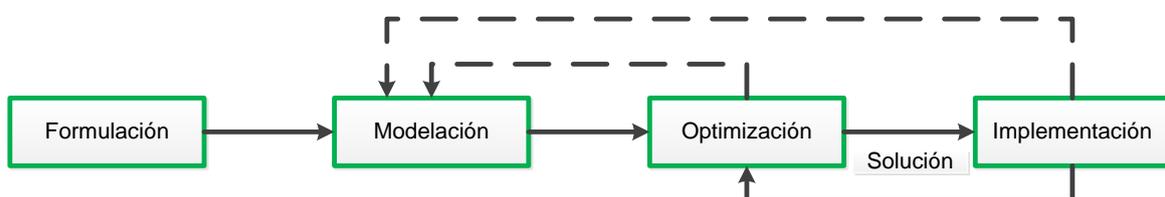
Para poder hallar la solución de un problema, inclusive para poder comenzar a analizarlo, es necesario saber que existe un problema y en qué consiste; o dicho en otras palabras, determinar y formular el problema.

Los sistemas productivos, económicos, etc., presentan, generalmente, el inconveniente de no poder experimentar físicamente con ellos las diversas variantes para hallar la respuesta a esto, ya sea buena u óptima; por eso lo que se hace es buscar una representación del sistema en forma matemática o, lo que es lo mismo, construir un modelo por medio de ecuaciones que permitan experimentar con el mismo.

Una solución óptima es aquella que maximiza o minimiza la utilidad de un modelo, pero como esto no es la representación del problema real, la solución óptima puede no ser la mejor solución del sistema. Por lo tanto, de acuerdo con la calidad del modelo propuesto, las soluciones óptimas derivadas de él serán más o menos buenas para el problema real. Es por esto necesario probar el modelo y evaluar la solución para ver si mejora el sistema objeto de análisis.

**Tabla 1.1. Clasificación de las decisiones en relación a su jerarquía**

	Flujo material
Estratégicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de instalaciones</li> <li>• Ubicación de los instalaciones</li> <li>• Capacidad de las instalaciones</li> <li>• Tipos de instalaciones (manufactura, almacenes, etc.)</li> <li>• Selección de los proveedores</li> </ul>
Tácticas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Previsión de la demanda</li> <li>• Cantidad de materias primas y productos para producir y enviar a las instalaciones</li> <li>• Cantidad de materias primas, producción intermedia y terminada para sostener el inventario</li> <li>• Seleccionar medios y rutas para el transporte</li> <li>• Volumen y tipo de inventario</li> <li>• Stock de seguridad</li> </ul>
Operativas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Control de inventarios</li> <li>• Reposición del stock</li> <li>• Evaluación de las prestaciones del suministrador</li> <li>• Precio</li> <li>• Cumplimiento de la demanda</li> <li>• Control de calidad</li> </ul>

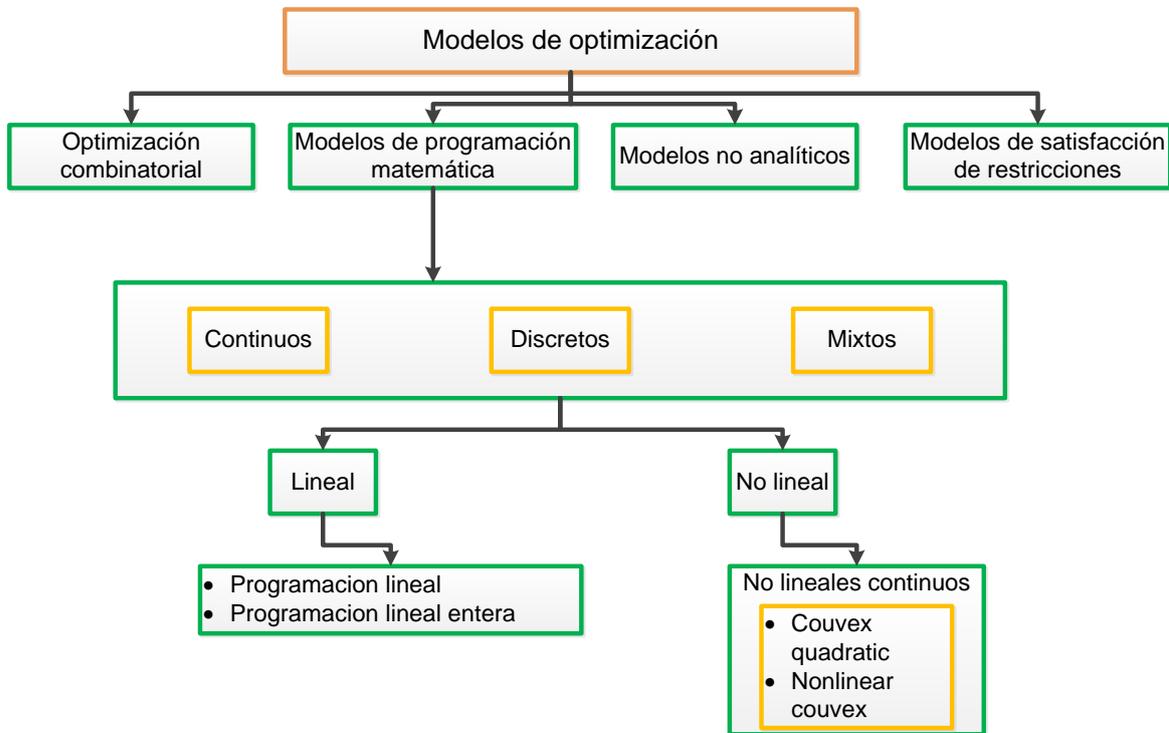


**Figura 1.4. Proceso clásico de toma de decisiones. Fuente: (Talbi, 2009)**

La implementación consiste en la ejecución de la solución hallada; se debe tratar que esta se lleve a cabo cuando el personal que tiene que ver con la misma esté debidamente preparado. Esta preparación puede desarrollarse por medio de cursos que

se realicen con el objetivo de encontrar el personal con los nuevos conceptos o labores. (Ing. José M. Trujillo, 1983)

Diferentes familias de modelos de optimización son utilizadas para formular y resolver problemas de toma de decisiones, véase figura 1.5.



**Figura1.5. Modelos de optimización. Fuente: (Talbi, 2009)**

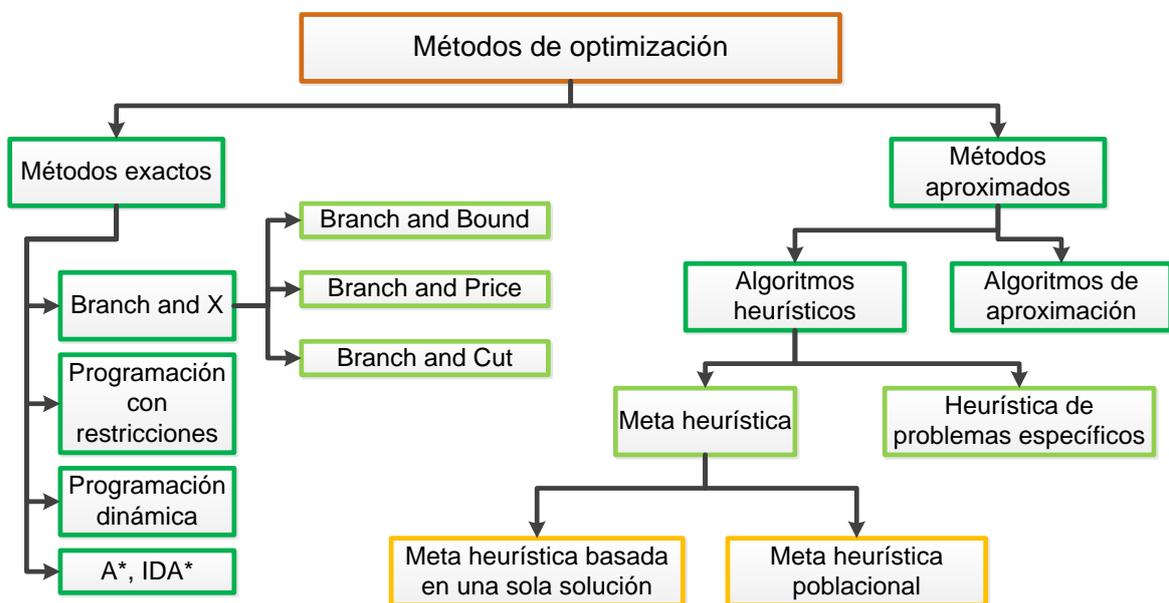
En la programación lineal tanto la función objetivo como las restricciones son funciones lineales. Por otro lado los modelos de programación no lineal se ocupan de problemas de programación matemática donde la función objetivo y/o las restricciones son no lineales. Los modelos no lineales continuos son mucho más complicados de resolver aunque hay muchas posibilidades de modelado que pueden ser utilizados para linealizar un modelo. Las técnicas de linearización introducen en general variables y restricciones extras al modelo y en algunos casos un cierto grado de aproximación. (Glover, 1977)

Un modelo de optimización de programación en enteros (IP) denota implícitamente modelos lineales y las variables de decisión son discretas. (Wolsey, 1999). Cuando las variables de decisión son tanto continuas como discretas se trata de problemas de programación entera mixta (MIP). Por lo tanto, los modelos MIP generalizan modelos LP e IP.

Una clase más general del problema IP son los problemas de optimización combinatoria. Esta clase de problema se caracteriza por variables de decisión discretas y en un espacio de búsqueda finito. Sin embargo, la función objetivo y las restricciones pueden adoptar cualquier forma. (Steiglitz, 1982).

Otro enfoque común de los modelos de decisión y problemas de optimización es programación con restricciones (CP). Un paradigma de programación que integra herramientas de modelado más ricas que las expresiones lineales de modelos MIP, donde un modelo está compuesto por un conjunto de variables y cada variable tiene un dominio finito de valores. En el modelo se pueden expresar restricciones simbólicas y matemáticas relacionadas con las variables. Las restricciones globales representan limitaciones que se refieren a un conjunto de variables. Los modelos declarativos en CP son flexibles y en general son más compactos que los modelos MIP.

Los modelos de optimización pueden ser resueltos utilizando métodos exactos o métodos aproximados como se muestra en la figura 1.6, la decisión de utilizar el tipo de método esta en dependencia de la complejidad del problema, que pueden ser de dos clases.



**Figura 1.6. Métodos de optimización. Fuente: (Talbi, 2009)**

Los problemas clase NP son aquellos donde se conocen algoritmos que necesitan un tiempo polinomial para ofrecer una solución óptima y se consideran que son solubles eficientemente y en los problemas clase NP-hard, por su parte, no se conoce algoritmos de solución polinomial, aunque si es posible, dado una solución, comprobar en tiempo polinomial si su costo es mejor que un determinado valor, (Talbi, 2009). Estos problemas NP-hard son difíciles de resolver y son la mayoría de los problemas con aplicación práctica, científica e industrial, entonces de lo que se trata es de desarrollar procedimientos eficientes para encontrar buenas soluciones aunque sean no óptimas.

Los métodos aproximados garantizan una solución de buena calidad en un tiempo razonable para su uso práctico, pero no garantizan que se encuentre el óptimo global.

Problemas de alta complejidad pueden ser resueltos utilizando métodos exactos siempre y cuando el número de instancias a modelar sea pequeño, (Talbi, 2009) define el número

máximo de instancias posibles a modelar para algunos problemas clásicos NP-hard. Por otro lado cuando el número de instancias es grande se utilizan los métodos aproximados. A diferencia de las heurísticas, que generalmente se encuentran razonablemente buenas soluciones en un tiempo razonable, los algoritmos de aproximación proporcionan calidad de la solución demostrable y los límites de tiempo de ejecución demostrables.

La gran mayoría de los autores consultados (Reeves, 1996), (Hooker, 1995), (Siarry, 2005), (Talbi, 2009)) coinciden en que las diferencias radican en la posibilidad de ser aplicados a múltiples problemas. Las heurísticas están diseñadas para resolver un problema específico mientras que las meta heurísticas tienen un propósito general, pues pueden ser aplicadas para resolver casi cualquier problema de optimización.

Uno de los campos más populares de aplicación de las técnicas antes descritas lo constituye la logística y la cadena de suministro, lo cual se demuestra en las publicaciones más recientes sobre el tema. El diseño de cadenas de suministro es uno de los aspectos que mayor impacto ha tenido en cuanto al uso de algoritmos matemáticos para su modelación y optimización, es por ello que en el apartado siguiente se analiza con mayor detalle este aspecto.

#### **1.6. El problema del diseño de cadenas de suministro**

La configuración de la cadena de suministro, en lo adelante SCND, está considerado como un tema importante dentro de la gestión de la cadena de suministro y la logística, que tiene una influencia indispensable en el rendimiento total de la cadena de suministro (Keyvanshokoo et al., 2013). El problema de diseño de la red es uno de los problemas de decisión estratégicos más amplios que necesita ser optimizado para un funcionamiento eficiente a largo plazo de toda la cadena de suministro.

Durante el proceso de SCND se determina un conjunto de parámetros de configuración, incluyendo el número, ubicación, capacidad, y el tipo de las diferentes instalaciones de la red (Wang et al., 2011) todas son decisiones de carácter estratégico. Sin embargo varios autores como (D Simchi-Levi, 2004) y (Reza Zanjirani Farahani, 2014) plantean que este problema implica tomar decisiones en los tres niveles: estratégico, táctico y operativo.

La mayoría de los modelos de diseño encontrados en la literatura, en el contexto de SCND, se enfocan en la localización de instalaciones con otros aspectos operativos para minimizar el costo total de una cadena (Shen, 2007). Sin embargo (Reza Zanjirani Farahani, 2014) plantea que la decisión más importante es localizar las instalaciones porque es el punto de partida para la creación de los modelos de diseño. Al respecto destacan las investigaciones de (Melo, 2009) y (Klibi, 2010) quienes realizan una revisión exhaustiva de la literatura relacionada con localización de instalaciones en el contexto de la cadena de suministro y presentan comentarios generales sobre el problema de diseño

de cadenas de suministro para soportar una amplia variedad de flujos futuros de investigación.

Para estructurar la revisión de la literatura referida al SCND, se han clasificado los documentos básicos y más citados en esta área de acuerdo con cinco características generales: definición del problema, modelado, función objetivos, variable de decisión y métodos de solución. Revisiones interesantes referidas al temas han sido realizadas por (Keyvanshokoo et al., 2013), (Melo, 2009) y (Reza Zanjirani Farahani, 2014), las que han sido tomadas en cuenta y enriquecidas para conformar la tabla 1.2.

- En cuanto al tipo de cadena de suministro, inicialmente las investigaciones relacionadas con el tema se enfocaron en modelar cadenas directas, luego hubo un auge en la modelación de cadenas inversas y en la actualidad la tendencia es el modelado cadenas de ciclo cerrado.
- La gran mayoría de los modelos de optimización de cadenas de suministro conciben tres eslabones y/o niveles de la cadena. Respecto al producto varía en las diferentes investigaciones.
- En sus inicios el problema de diseño de cadenas de suministro fue usualmente modelado como un problema de un solo objetivo y teniendo en cuenta un solo periodo de tiempo. Recientemente diferentes investigaciones han considerado la optimización multicriterio en múltiples horizontes de planificación.
- Usualmente el aspecto considerado estocástico es la demanda, muy pocos modelos consideran incertidumbre en los proveedores y en los parámetros. En el tratamiento incertidumbre de los proveedores suele utilizarse el método AHP de Saaty con lógica difusa, mientras que los costos de transportación y producción son los parámetros estocásticos más representados. La mayoría de las investigaciones iniciales en el contexto de diseño de CS fueron de carácter determinista en un solo periodo de tiempo (ver (Melo, 2009)).
- La determinación de cuales parámetros representar en el sistema es muy variado en base al alcance definido por el investigador. Mientras que para modelar se utiliza la programación lineal entera mixta (MILP) y en algunas investigaciones la programación no lineal entera mixta (MINLP).
- La complejidad de las cadenas de suministro ha llevado a la inclusión de varias variables de decisión en el diseño de cadenas, además de las clásicas de localización/asignación.

Tabla 1.2.: Investigaciones sobre optimización en el diseño de CS. Fuente: (Keyvanshokoo et al., 2013) y (Reza Zanjirani Farahani, 2014)

Artículo	Definición del problema									
	No. eslabones	Tipo de Cadena		Periodo		Producto		Consideraciones de incertidumbre		
		Directa	Inversa	Multi-periodo	Single-periodo	Multi-producto	Single-producto	Demanda	Suministradores	Parámetros
<u>(Altıparmak et al., 2009)</u>	4	X	X		X	X		-	-	-
<u>(Azaron et al., 2009)</u>	3	X			X	X		X	X	X
<u>(Bassett and Gardner, 2013)</u>	3	X		X		X		-	-	-
<u>(Cardona-Valdés et al., 2011)</u>	2	X			X		X	X	-	-
<u>(Daskin et al., 2002)</u>	3	X			X		X	X	-	-
<u>(Franca et al., 2010)</u>	3	X		X		X		X	-	-
<u>(Georgiadis et al., 2011)</u>	3	X			X	X		X	-	-
<u>(Goh et al., 2007)</u>	2	X			X		X	X	-	X
<u>(Gumus et al., 2009)</u>	3	X			X		X	X	-	-
<u>(Jayaraman et al., 2003)</u>	3		X		X		X	-	-	-
<u>(Ko and Evans, 2007)</u>	3	X		X		X		-	-	-

**Tabla 1.2. (Continuación)**

Artículo	Definición del problema									
	No. eslabones	Tipo de Cadena		Periodo		Producto		Consideraciones de incertidumbre		
		Directa	Inversa	Multi-periodo	Single-periodo	Multi-producto	Single-producto	Demanda	Suministradores	Parámetros
<u>(Lin and Wang, 2011)</u>	3	X			X	X		X	X	-
<u>(Listeş and Dekker, 2005)</u>	4		X		X	X		X	X	-
<u>(Max Shen and Qi, 2007)</u>	2	X			X		X	X	-	-
<u>(Osman and Demirli, 2010)</u>	3	X		X			X	-	-	-
<u>(Pan and Nagi, 2010)</u>	3	X		X			X	X	-	-
<u>(Peidro et al., 2009)</u>	3	X		X		X		X	X	X
<u>(Pishvae and Torabi, 2010)</u>	6	X	X	X			X	-	-	-
<u>(Pishvae et al., 2011)</u>	5	X			X		X	X	-	X
<u>(Qi and Shen, 2007)</u>	2	X			X		X	X	X	-
<u>(Romeijn et al., 2007)</u>	2	X			X		X	X	-	-
<u>(Sabri and Beamon, 2000)</u>	3	X			X	X		X	-	X
<u>(Salema et al., 2009)</u>	2	X	X	X		X		-	-	-

**Tabla 1.2. (Continuación)**

Artículo	Definición del problema									
	No. eslabones	Tipo de Cadena		Periodo		Producto		Consideraciones de incertidumbre		
		Directa	Inversa	Multi-periodo	Single-periodo	Multi-producto	Single-producto	Demanda	Suministradores	Parámetros
<u>(Santoso et al., 2005)</u>	3	X			X	X		X	X	X
<u>(Sawik, 2011)</u>	2	X			X		X	-	X	-
<u>(Schütz et al., 2009)</u>	3	X		X		X		X	X	X
<u>(Shen, 2005)</u>	2	X			X	X		-	-	-
<u>(Shen et al., 2003)</u>	3	X			X		X	X	-	-
<u>(Shen and Daskin, 2005)</u>	3	X			X		X	X	-	-
<u>(Shih, 2001)</u>	3		X		X	X		-	-	-
<u>(Shu et al., 2005)</u>	3	X			X		X	X	-	-
<u>(Torabi and Hassini, 2008)</u>	2	X			X	X		X	-	X
<u>(Tsiakis et al., 2001)</u>	3	X			X	X		X	-	-
<u>(Üster et al., 2007)</u>	3	X	X		X		X	-	-	-
<u>(Wang et al., 2011)</u>	3	X			X	X		-	-	-
<u>(Wang, 2009)</u>	3	X			X		X	-	-	X
<u>(Xu et al., 2008)</u>	3	X			X		X	X	-	X
<u>(You and Grossmann, 2008)</u>	3	X		X			X	X	-	-

**Tabla 1.2. (Continuación)**

Artículo	Definición del problema									
	No. eslabones	Tipo de Cadena		Periodo		Producto		Consideraciones de incertidumbre		
		Directa	Inversa	Multi-periodo	Single-periodo	Multi-producto	Single-producto	Demanda	Suministradores	Parámetros
<u>(You and Grossmann, 2009)</u>	3	X			X		X	X	-	-
<u>(Jayaraman et al., 1999)</u>	3		X		X	X		-	-	-
<u>(Min et al., 2006)</u>	2		X	X			X	-	-	-
<u>(Lieckens and Vandaele, 2007)</u>	1		X		X		X	-	-	-
<u>(Demirel and Gökçen, 2008)</u>	4		X		X	X		-	-	-
<u>(Du and Evans, 2008)</u>	4		X		X	X		-	-	-
<u>(Aras et al., 2008)</u>	1		X		X	X		-	-	-
<u>(Pishvae et al., 2010b)</u>	2		X		X		X	-	-	-
<u>(Fleischmann et al., 2001)</u>	5	X	X		X		X	-	-	-
<u>(Min and Ko, 2008)</u>	6	X	X	X		X		-	-	-
<u>(Lee and Dong, 2009)</u>	5	X	X	X		X		-	-	X
<u>(El-Sayed et al., 2010)</u>	7	X	X	X			X	-	-	-
<u>(Pishvae et al., 2010a)</u>	5	X	X		X		X	-	-	-
<u>(Wang and Hsu, 2010)</u>	6	X	X		X		X	-	-	-

**Tabla 1.2. (Continuación)**

Artículo	Función objetivo			Proyecto
	Costo	Ganancia	Otros	Método de solución
<u>(Altıparmak et al., 2009)</u>	X	-	-	STEADY- state genetic algorithms
<u>(Azaron et al., 2009)</u>	X	-	-	STEM-method
<u>(Bassett and Gardner, 2013)</u>	X	X	-	L-shaped algorithms within an optimality framework
<u>(Cardona-Valdés et al., 2011)</u>	X	-	-	L-shaped algorithms within an optimality framework
<u>(Daskin et al., 2002)</u>	X	-	-	Lagrangian relaxation
<u>(Franca et al., 2010)</u>	X	X	-	contrains method
<u>(Georgiadis et al., 2011)</u>	X	-	-	Standard branch- and-boun techniques
<u>(Goh et al., 2007)</u>	X	X	-	Heuristic solution methodology (descomposition based approach)
<u>(Gumus et al., 2009)</u>	X	-	-	Neuro-fuzzy and mixed integer linear programming
<u>(Jayaraman et al., 2003)</u>	X	-	-	Heuristic solution methodology
<u>(Ko and Evans, 2007)</u>	X	X	-	Genetic algorithm-based heuristic
<u>(Lin and Wang, 2011)</u>	x	-	-	solution algorithm
<u>(Listeş and Dekker, 2005)</u>	X	X	-	Branch and bound
<u>(Max Shen and Qi, 2007)</u>	X	-	-	Lagrangian relaxation embedded in a branch-and-bound procedure
<u>(Osman and Demirli, 2010)</u>	x	-	-	Modified benders descomposition algorithm
<u>(Pan and Nagi, 2010)</u>	x	-	-	Heuristic method
<u>(Peidro et al., 2009)</u>	x	-	-	Fuzzy approach
<u>(Pishvae and Torabi, 2010)</u>	X	-	-	Fuzzy approach
<u>(Pishvae et al., 2011)</u>	X	-	-	CPLEX
<u>(Qi and Shen, 2007)</u>	X	X	-	Lagrangian relaxation
<u>(Romeijn et al., 2007)</u>	X	-	-	Column generation
<u>(Sabri and Beamon, 2000)</u>	X	X	X	contrains method
<u>(Salema et al., 2009)</u>	X	X	-	Standard branch- and-boun techniques
<u>(Sawik, 2011)</u>	x	-	-	CPLEX
<u>(Schütz et al., 2009)</u>	X	-	-	SAA and dual descomposition
<u>(Shen, 2005)</u>	X	-	-	Lagrangian relaxation embedded in a branch-and-bound procedure

**Tabla 1.2. (Continuación)**

Artículo	Función objetivo			Proyecto
	Costo	Ganancia	Otros	Método de solución
<u>(Shen et al., 2003)</u>	X	-	-	Column generation
<u>(Shen and Daskin, 2005)</u>	X	-	X	Weigthing method and genetic algorithms
<u>(Shih, 2001)</u>	X	X	-	Branch and bound
<u>(Shu et al., 2005)</u>	X	-	-	Column generation
<u>(Torabi and Hassini, 2008)</u>	x	-	-	Fuzzy approach
<u>(Tsiakis et al., 2001)</u>	X	-	-	Mixed-integer linear programming
<u>(Üster et al., 2007)</u>	X	-	-	Benders descomposition approach with multiple cut
<u>(Wang et al., 2011)</u>	X	-	-	Normalized normal constrain method
<u>(Wang, 2009)</u>	x	-	-	Two-phase ant colony algoritm
<u>(Xu et al., 2008)</u>	X	-	X	Spanning-tree based genetic algorithms
<u>(You and Grossmann, 2008)</u>	x	-	-	contrains method
<u>(You and Grossmann, 2009)</u>	X	-	-	Descomposition algorithm
<u>(Jayaraman et al., 1999)</u>	X	-	-	Commercial solver
<u>(Min et al., 2006)</u>	X	-	-	Genetic algorithm
<u>(Lieckens and Vandaele, 2007)</u>	-	X	-	Genetic algorithm
<u>(Demirel and Gökçen, 2008)</u>	X	-	-	Commercial solver
<u>(Du and Evans, 2008)</u>	X	-	X	Búsqueda dispersa
<u>(Aras et al., 2008)</u>	X	-	-	Búsqueda tabú
<u>(Pishvae et al., 2010b)</u>	X	-	-	Recocido simulado
<u>(Fleischmann et al., 2001)</u>	X	-	-	Commercial solver
<u>(Min and Ko, 2008)</u>	X	-	-	Genetic algorithm
<u>(Lee and Dong, 2009)</u>	X	-	-	Recocido simulado
<u>(El-Sayed et al., 2010)</u>	-	X	-	Commercial solver
<u>(Pishvae et al., 2010a)</u>	X	-	X	Memetic
<u>(Wang and Hsu, 2010)</u>	X	-	-	Commercial solver

- Las funciones objetivas son diferentes en las investigaciones. Tradicionalmente la función objetivo en este tipo de problemas es principalmente monetaria (por ejemplo: minimizar costo, maximizar ganancia). Sin embargo recientemente nuevos paradigmas han surgido considerando otras como: nivel de servicio al cliente, consideraciones ambientales y sociales y flexibilidad del volumen. (Ver (Reza Zanjirani Farahani, 2014); (Sabri and Beamon, 2000))
- En cuanto a las restricciones, hay algunas que son tenidas en cuenta con mucha frecuencia en la literatura especializada como las que garantizan que se satisfaga la demanda de los clientes, las que se aseguran de que no se exceda la capacidad de las instalaciones, las que hacen cumplir la conservación del flujo de productos en la red. No pueden faltar las restricciones que hacen cumplir la naturaleza binaria de algunas variables de decisión y la no negatividad de otras.
- En modelos para cadenas de suministro de flujo inverso o de ciclo cerrado se incorporan otros parámetros, variables y restricciones; relacionados con las instalaciones propias de este tipo de cadenas: los centros de recolección de productos, centros de recuperación y centros de reciclaje. Se suman restricciones que hacen cumplir una mínima fracción de eliminación de desechos para los productos, y para los ciclos cerrados se debe garantizar que el flujo directo sea mayor que el flujo inverso.
- En las partidas de costo a minimizar en las cadenas inversas o de ciclo cerrado se añaden las relacionadas con la recuperación y eliminación de productos.
- En general el SCND ha sido resuelto tanto por métodos exactos como aproximados incluidos branch and bound ((Shih, 2001); (Listeş and Dekker, 2005); (Shen, 2005); (Qi L, 2007); (Salema, 2010); (Georgiadis et al., 2011); (Longinidis P, 2011)), la relajación de Lagrange ((Daskin et al., 2002); (Shen, 2005); (Qi L, 2007); (Qi and Shen, 2007)), la descomposición de Benders ((Santoso et al., 2005); (Üster et al., 2007); (Osman and Demirli, 2010)),  $\epsilon$ -constraint method ((Sabri and Beamon, 2000); (Guillén, 2006); (You and Grossmann, 2008); (Franca et al., 2010); (Olivares-Benitez E, 2012)), los algoritmos genéticos ((Shen and Daskin, 2005); (Shu et al., 2005); (Ko and Evans, 2007); (Xu et al., 2008); (Altıparmak et al., 2009)), búsqueda tabú y recocido simulado (Javid AA, 2010), entre otros.
- Al respecto (Salema, 2010) plantean que se espera que se haga muy complejo solucionar formulaciones de MILP para problemas grandes, y que para mejorar el rendimiento podrían utilizarse otras técnicas como la descomposición de Bender.
- Los factores financieros son algunos de los temas que tienen un fuerte impacto en la configuración de las cadenas mundiales de suministro (Melo, 2009). Sin embargo aunque se han desarrollado numerosos modelos exitosos para el diseño y operación de

las cadenas de suministro, su gran mayoría ignora las decisiones financieras que impliquen ingresos, campañas de marketing, la cobertura contra la incertidumbre, la planificación de inversiones y otras decisiones corporativas (Shapiro, 2004). En el siguiente apartado se exponen algunas de las pocas investigaciones encontradas en la web que tienen en cuenta este tipo de decisiones.

### **1.7. Modelos de optimización de cadenas de suministro considerando aspectos financieros**

A pesar de muchos autores que han mencionado la importancia de las consideraciones financieras en el contexto gestión de la cadena de suministro ((Shapiro, 2004); (Hammami, 2008); (Melo, 2009), (Papageorgiou, 2008) muy pocas contribuciones se puede encontrar en la literatura. Resulta de interés para la investigación la clasificación realizada por (Longinidis P, 2011), el cual plantea que los modelos de gestión de la cadena de suministro con aspectos financieros pueden dividirse en dos grupos. Aquellos en los que los aspectos financieros se consideran variables dentro del modelo a optimizar junto con el resto de variables en el SCND y por otro lado aquellos modelos en los que los aspectos financieros se consideran parámetros conocidos utilizados en las restricciones y en la función objetivo

En cuanto al primer grupo, el trabajo de (Puigjaner, 2008) y coautores representa una clave contribución al área. Romero et al. (2003) construyen un modelo matemático determinista de múltiples periodos para procesos de industria química donde combina la programación y planificación de la producción con el flujo de caja y la gestión presupuestaria. En el mismo sentido, (Badell, 2004) propusieron un modelo mixto de programación lineal entera multi-periodo determinista para procesos de la industria química, que integra la planificación y la programación a nivel de planta con el flujo de caja y presupuestos avanzados. (Guillén, 2006) introduce el modelo mixto programación lineal entera determinista, para una cadena de suministro de productos químicos multi-producto de varios eslabones, donde optimiza simultáneamente las decisiones de programación y planificación con el flujo de caja. La función objetivo es el cambio en el patrimonio de la empresa, una característica novedosa frente a modelos anteriores.

(Yi, 2004) presenta un modelo de optimización paramétrica de dos niveles a nivel de planta para el diseño óptimo de redes de almacenamiento donde se integran decisiones de producción con las transacciones financieras a través de la asignación de flujos de efectivo en cada actividad productiva. (Lainez, 2007) propuso un modelo MILP determinista para el diseño óptimo de la cadena de suministro de productos químicos basados en modelos operaciones integrales que cubre tanto el proceso como las

finanzas de la empresa y donde la función objetivo es maximizar el valor corporativo de la empresa.

En cuanto el segundo grupo, (Melo, 2009) presentó un modelo de múltiples productos para la ubicación de las instalaciones. El modelo fue formulado como un problema MILP que considera simultáneamente muchos aspectos prácticos de SCND mientras que la disponibilidad de las inversiones de capital fue el aspecto financiero incorporado en el modelo. (Tsiakis, 2008) presenta un modelo MILP determinista para la configuración óptima de una red de producción y distribución. En el modelo se tiene como objetivo reducir al mínimo el costo total a través de la red y le incorpora limitaciones financieras de tipos de cambio.

(Hammami, 2009) propuso un modelo multi-producto, multi-planta y de varios eslabones utilizando la MILP. Aspectos financieros de este modelo fueron los precios de transferencia, asignación de los costos de proveedores y asignación de costos de transporte. (Sodhi, 2009) presenta un modelo de programación lineal estocástico de planificación de la cadena de suministro similar a la del modelo de gestión de activos y pasivos. Limitaciones de gestión de flujo de caja y endeudamiento fueron los aspectos financieros del modelo cuyo objetivo era maximizar el valor presente neto esperado del dinero en efectivo en el horizonte de planificación indicada.

Es evidente a partir de la literatura anterior sobre modelos SCM, que la integración de los aspectos financieros se ha centrado en la programación y planificación de las industrias de producción seriada, mientras que el presupuesto y la gestión del flujo de efectivo son consideraciones financieras humildemente tratadas. Aunque la gestión del flujo de caja y el presupuesto de capital son importantes entre las operaciones financieras, la empresa debe tener un estatus competitivo financiero global (Longinidis P, 2011). De los modelos anteriores, solo el de (Longinidis P, 2011) formula la situación financiera de la empresa en diferentes periodos de tiempo, a través del comportamiento de razones financieras tales como la solvencia y la liquidez, entre otras.

Según la clasificación más común (Ross, 2006), las razones de liquidez miden la capacidad de la empresa para pagar sus deudas a corto plazo mientras las razones de solvencia miden la capacidad de la empresa para cumplir con sus obligaciones a largo plazo. Un comportamiento ideal en las finanzas es que los activos circulantes sean el doble de los pasivos circulantes, aunque como un escenario adecuado es que asean iguales. En esta investigación se propone un enfoque de programación matemática integrada para el diseño óptimo de la red de la cadena de suministro en virtud del capital de trabajo.

El capital de trabajo, algunas veces denominado capital de trabajo neto, es la inversión que una empresa realiza en activos a corto plazo (Weston J.Fred 2000). También conocido como fondo de maniobra, se define como la diferencia entre los activos circulantes y los pasivos circulantes, representa un índice de estabilidad financiera o margen de protección para los acreedores actuales y para futuras operaciones (Gitman, 2006).

La administración del capital de trabajo, es uno de los aspectos más importantes en todos los campos de la administración financiera, posibilitando la obtención de resultados favorables desde el punto de vista económico financiero para la organización. Todas estas decisiones repercuten finalmente en la liquidez y solvencia de la entidad, ya que mientras más amplio sea el margen entre los activos corrientes que posee la organización y sus pasivos circulantes mayor será la capacidad de cubrir las obligaciones a corto plazo, pero también menor rendimiento en el financiamiento.

### **1.7. Conclusiones parciales**

Una vez culminado el marco teórico - referencial de esta investigación, se pueden señalar las conclusiones siguientes:

1. Desde la definición de la cadena de suministro y su esquematización se observa la relevancia de considerar los flujos financieros para gestionarla.
2. Las decisiones logísticas pueden clasificarse por su jerarquía en estratégicas, tácticas y operativas.
3. Diferentes familias de modelos de optimización son utilizadas para formular y resolver problemas de toma de decisiones. Para el diseño de la cadena de suministro se utiliza con mucha frecuencia la programación lineal entera mixta (MILP) y en algunas investigaciones la programación no lineal entera mixta (MINLP).
4. Los modelos de optimización pueden ser resueltos utilizando métodos exactos o métodos aproximados en dependencia de la complejidad del problema.
5. Muy pocas investigaciones integran en la optimización de la cadena de suministro cuestiones financieras, encontrando solamente una cuyo modelo formula la situación financiera de la empresa.
6. Incluir el capital de trabajo en la modelación de la cadena de suministro permite la obtención de resultados favorables desde el punto de vista económico financiero, pues garantiza el capital para futuras operaciones y mantiene niveles de solvencia y liquidez adecuados.

## **CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA OPTIMIZAR EL DISEÑO DE CADENAS DE SUMINISTRO DIRECTAS BAJO RESTRICCIONES FINANCIERAS**

### **2.1. Introducción**

Los actuales modelos de optimización matemáticos de la cadena de suministro (CS) utilizan criterios de decisión relacionados con el flujo de material dentro del sistema ignorando la situación financiera de la empresa, su capacidad para implementar decisiones como apertura y funcionamiento de instalaciones, compra de materiales y transportación de materiales y productos dentro de la red, entre otras. La mayoría de las investigaciones consultadas dan por hecho que las organizaciones pueden desembolsar el capital necesario en el instante que es preciso hacerlo.

El presente capítulo expone un procedimiento metodológico que permite optimizar el diseño de red de cadena de suministro teniendo en cuenta tanto el flujo material como el financiero al insertar restricciones relacionadas con el capital de trabajo en un modelo matemático para cadenas directas.

### **2.2. Descripción del procedimiento general**

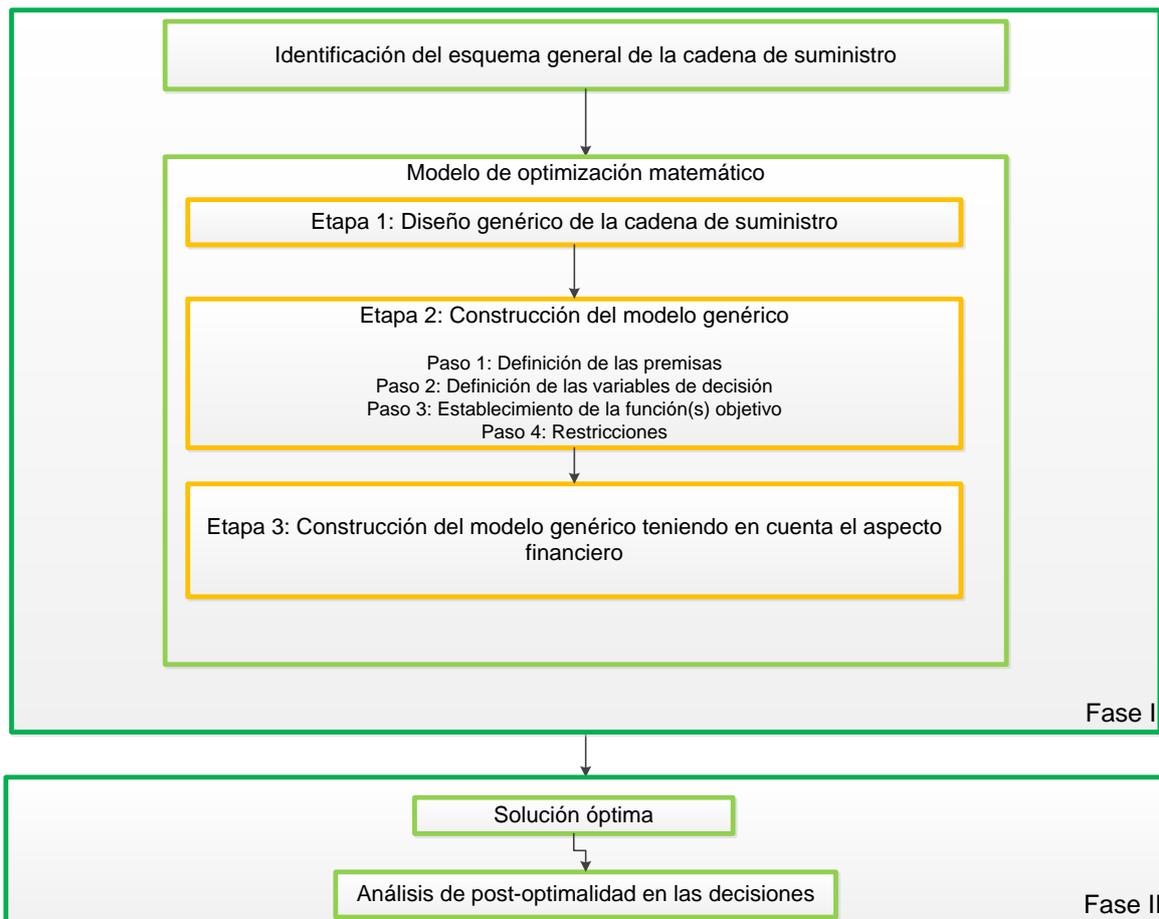
El procedimiento (ver Figura 2.1) que se plantea y que será explicado a detalle a lo largo del presente capítulo, nace como respuesta al problema científico de acuerdo a la escasez de modelos integrales de la cadena de suministro que optimicen simultáneamente el aspecto material y el financiero, más allá del análisis de sensibilidad de algunos parámetros financieros, detectadas en el análisis del marco teórico y referencial de la presente investigación. El mismo se describe, de acuerdo al estudio de 2 fases; una primera dedicada a las cuestiones más generales sobre la modelación de la CS y a las cuestiones financieras que se plantean tener en cuenta en la optimización y una segunda de decisión final.

### **2.3. Fase I: Modelación genérica de la cadena de suministro**

La presente fase proporciona al decisor los principales aspectos a considerar para la modelación de cualquier cadena de suministro específicamente para una cadena directa. Cada una de las acciones para desarrollar la modelación se describen según un esquema genérico de la realidad objetiva (ver Figura 2.1.).

#### **2.3.1. Identificación del esquema general de la cadena de suministro**

El análisis de la cadena de suministro es un tema de valor para lograr la efectividad y fiabilidad de la decisión final sobre su diseño. En este momento de la investigación, pudiera desplegarse internamente toda una metodología para su realización, sin embargo, para efectos del presente procedimiento, se exponen de manera general los eslabones principales de la cadena y el objetivo del análisis de cada uno.



**Figura 2.1. Procedimiento general**

Se ha establecido el estudio de la cadena de acuerdo a 3 subsistemas fundamentales: abastecimiento, producción y distribución (ver Figura 2.2.).

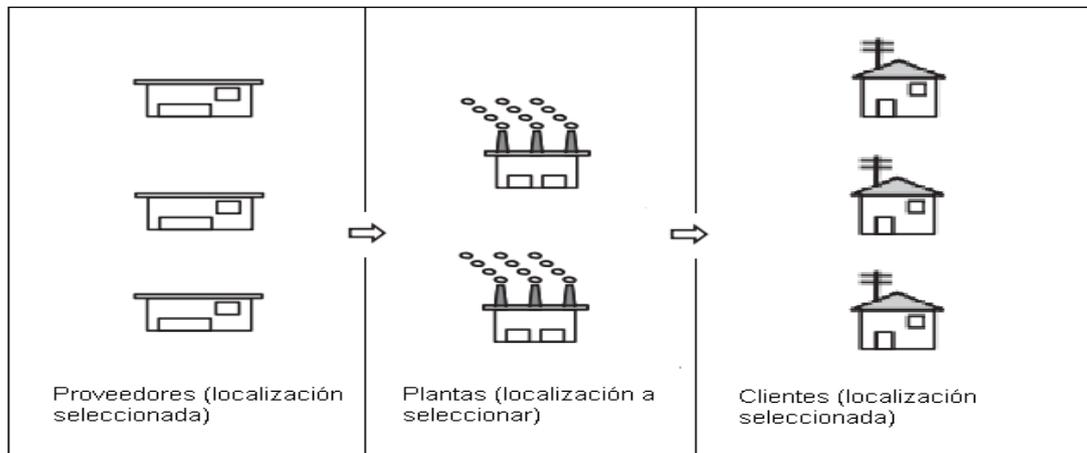
Es necesario identificar a los clientes potenciales y contemplar un plan de distribución del producto final demandado, considerándose para esto los costos de transporte y almacenamiento asociados. Los costos por demanda insatisfecha de los clientes, no es un elemento ampliamente abordado en la literatura científica, pero que será incluido en la presente investigación. Para satisfacer la demanda se establecen los procesos de transformación y producción y finalmente se determina el plan de suministro y los costos de transporte y almacenamiento asociados.

### 2.3.2. Modelo de optimización matemático

En este momento se proporciona al decisor los principales aspectos a considerar para la modelación de cualquier cadena de suministro directa, específicamente una que comprenda las decisiones clásicas de flujo de materiales.

En el estudio de la literatura científica se pudo identificar que la mayoría de los modelos consideran tres eslabones y/o niveles de la cadena, optimizan un solo objetivo que suele

ser el costo total y son de carácter determinista en un solo periodo de tiempo. Sin embargo para analizar la situación financiera de la CS es necesario modelar para varios periodos de tiempo. Por lo tanto, a continuación se propone un modelo de optimización matemática basado en el estudio de tres niveles de la cadena, que considera un solo producto, de carácter determinista y en varios periodos de tiempo.



**Figura 2.2. Esquema general de la cadena de suministro**

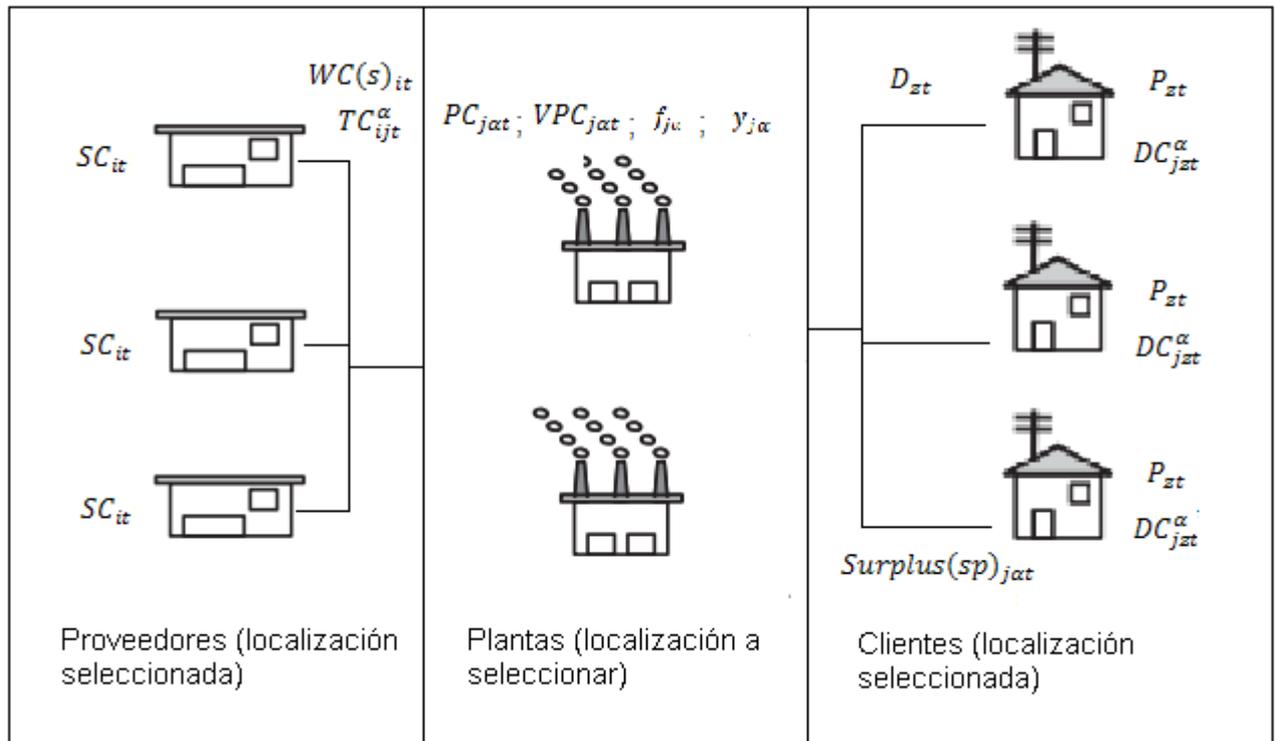
### **Etapa 1: Diseño genérico de la cadena de suministro**

El diseño y la formulación matemática de cualquier caso de estudio en la optimización requieren de abstracción y conocimiento detallado del objetivo con que se realiza. Resulta conveniente desarrollar una abstracción que conduzca a la representación gráfica, de esta forma se resumen las características y relaciones fundamentales entre los elementos que componen el sistema, en este caso el modelo de optimización deseado. Siguiendo estas experiencias, en la presente etapa se propone una representación aproximada (ver Figura 2.3.), la cual muestra las relaciones entre los principales subsistemas logísticos implicados en la cadena de suministro que se propone y algunas variables que deben ser consideradas en cualquier formulación matemática de la CS.

El esquema general muestra inicialmente la necesidad de demanda de un grupo de clientes geográficamente distribuidos, con un precio asociado ( $P_{zt}$ ) y con un costo por el incumplimiento de la demanda ( $UFDC_{zt}$ ). Suministrar las cantidades deseadas, en el tiempo correcto, implica mantener una flota de vehículos con apropiada capacidad de transportación, incurriendo en un costo de distribución ( $DC_{jzt}^{\alpha}$ ) y en algunos casos de almacenamiento intermedio de la producción demandada ( $WC(p)_{jzt}$ ). La demanda de los clientes ( $D_{zt}$ ) es suplida por un conjunto de plantas de producción las cuales presentan una capacidad limitada ( $PC_{jzt}$ ) (debido a razones como: la tecnología, capacidad en el emplazamiento, limitaciones financieras, mano de obra, carencia de materia prima y otros

insumos). La ubicación del conjunto de plantas resulta en la mayoría de los casos un problema complejo, además de que su localización implica significativas erogaciones fijas ( $f_{j\alpha}$ ) y otros costos variables de producción ( $VPC_{j\alpha t}$ ), los cuales dependen del lugar de ubicación ( $\alpha$ ) y fenómenos combinatoriales resultados del flujo de materiales en la cadena de suministro. La decisión final de localización o no dentro de un conjunto de alternativas de ubicación se designa con la variable binaria  $y_{j\alpha}$ .

Las plantas de producción son suministradas por almacenes que tiene una capacidad limitada ( $SC_{it}$ ) e incurren en un costo de almacenamiento  $WC(s)_{it}$ . De igual modo que en la distribución, contar con estos elementos para la producción genera desembolsos operativos en mantener una flota de vehículos para las actividades de aprovisionamiento. Los vehículos encargados de dicha actividad parten de un almacén que pueden ser parte de las instalaciones de los suministradores o pueden constituir un eslabón más en la cadena de suministro, los cuales proveen a las posibles plantas de producción con todos los elementos necesarios para cumplir con la demanda de los clientes finales y con un costo de transportación asociado ( $TC_{ijt}^\alpha$ ). En la presente investigación se incluyen los almacenes como parte de las instalaciones de los suministradores.



**Figura 2.3. Diseño genérico de la cadena de suministro**

**Etapas 2: Construcción del modelo genérico de optimización para la cadena de suministro**

Los principales pasos a tener en cuenta para la construcción del modelo de optimización son descritos en la presente etapa. Simultáneamente, una fundamentación teórica y la

implementación de cada paso para el esquema general propuesto en la Figura 2.3., integran la construcción del modelo genérico de optimización para la cadena de suministro.

### ***Paso 1: Definición de las premisas en el modelo***

Las premisas de un modelo de optimización son aquellas condiciones preliminares que deben ser cumplidas con la finalidad de alcanzar los objetivos deseados en la formulación de dicho modelo. El incumplimiento de estas condiciones generales puede conducir a dos errores clásicos de formulación matemática: representación errónea de la realidad decisional y/o incongruencias entre solución del modelo — solución factible en el contexto real. Un adecuado análisis de las condiciones preliminares, además de evitar los errores descritos anteriormente, es llevado a cabo si se considera tanto el alcance del modelo de optimización, así como, el conjunto de soluciones factibles iniciales consideradas para el modelo.

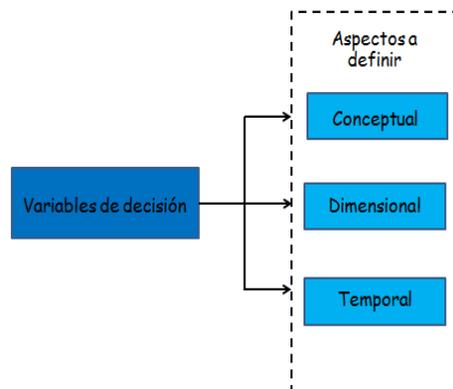
El alcance del modelo de optimización es un aspecto muy importante a definir dentro de las premisas de un modelo, ya que sugiere el inicio y el final del sistema, a partir de la definición inicio — final, son identificados los componentes, variables y parámetros que estarán en los siguientes pasos de la construcción modelo. En particular, para la cadena de suministro objeto de estudio, según la Figura 2.3., un modelo clásico de optimización comienza con la identificación de necesidades de los clientes potenciales y culmina con la definición de todos los proveedores, en este caso almacenes, de aquellas componentes necesarias en el proceso de producción en las plantas. Otro tipo de alcance a definir son las entradas y salidas de la modelación.

Realizar un análisis preliminar de soluciones factibles permite reducir las incongruencias futuras que pueden existir entre la solución final y una solución lógica y pertinente para el problema real que sea abordado. Si en la creación de un espacio de solución inicial, el cual constituye el conjunto de partida para la solución de un problema, son consideradas soluciones no factibles desde el punto de vista práctico, estas pudieran quedar como soluciones finales y por ende demeritan la utilidad de la herramienta. Es por ello, que es necesario un proceso de depuración de ese conjunto de soluciones iniciales, garantizando así desde el inicio la efectividad del modelo.

### ***Paso 2: Definición de variables de decisión***

Las variables de decisión, tal y como su nombre lo indican, constituyen el núcleo de referencia para la toma de decisiones en cualquier proceso de optimización. Su definición no es trivial para muchos problemas y en ocasiones la mayor parte del tiempo relativo a la construcción del modelo es dedicado a este paso. Por tales razones, resulta

conveniente considerar algunos aspectos generales (ver figura 2.4.) en la elaboración del modelo.



**Figura 2.4. Esquema para la definición de variables de decisión**

Siguiendo los aspectos generales de la figura anterior, pueden ser identificadas un grupo de variables para el modelo genérico de optimización. De acuerdo a los tres subsistemas logísticos, según la cadena de suministro ilustrada en la Figura 2.2, se deben considerar para la optimización de las cadenas de suministro las variables descritas en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1. Variables típicas en la optimización de cadenas de suministro**

Subsistemas	Variable	Concepto	Dimensión	Ámbito temporal
Distribución	$DR_{jzt}^{\alpha}$	Cantidad a distribuir	Masa (T) y/o Volumen (l)	Por año, mes, día
	Parámetros asociados:			
	Demanda de los clientes ( $D_{zt}$ ) dado en litros (l) y/o toneladas (T) Costo de distribución ( $DC_{jzt}^{\alpha}$ ) dado en unidades monetarias/distancia			
Producción	$y_{j\alpha}$	Ubicación de la planta	Dicotómica	Años, quinquenios, décadas
	Parámetros asociados:			
	Capacidad de producción ( $PC_{j\alpha t}$ ), dado en volumen (l) y/o masa (T)			
	Costo fijo de producción ( $f_{j\alpha}$ ) dado en unidades monetarias/emplazamiento			
Abastecimiento	$SR_{ijt}^{\alpha}$	Cantidad a suministrar	Masa (T) y/o Volumen (l)	Por año, mes, día
	Parámetros asociados:			
	Capacidad de los almacenes ( $SC_{it}$ ) Costo de transportación ( $TC_{ijt}^{\alpha}$ ) dado en unidades monetarias/distancia			

Una mirada reflexiva a la tabla 2.1. permite distinguir la heterogeneidad presente en las variables de decisión. Solamente definiendo una variable de decisión por su sistema logístico se puede apreciar que los dominios numéricos en dichas variables no son similares, específicamente aquella variable de decisión relativa a la ubicación de una planta en un determinado lugar. Este aspecto introduce mayor complejidad en los

siguientes pasos del modelo, además de la definición de los posibles algoritmos para la solución del modelo de optimización.

### *Paso 3: Establecimiento de la función(s) objetivo*

La función objetivo en un modelo de optimización es, o son aquellas expresiones matemáticas que guían el proceso de búsqueda dentro del espacio de posibles soluciones factibles. Establecer este tipo de expresión resulta una acción muy dependiente de los propósitos del estudio. Sin embargo, existe un conjunto clásico de funciones objetivos a formular dentro de una cadena de suministro, por lo general, estos objetivos presentan naturaleza puramente económica.

$$\text{Max (beneficio)} = \text{Ingresos} - \text{Gastos}$$

Venta de productos	<ul style="list-style-type: none"><li>• Almacenamiento</li><li>• Transporte</li><li>• Abastecimiento</li><li>• Distribución</li><li>• Incumplimiento de la demanda</li></ul>
--------------------	--

**Figura 2.5. Función objetivo del modelo de optimización**

En el caso de la función objetivo en esta investigación se indican una familia de funciones objetivos, relacionadas con minimizar todos los costos incurridos en la cadena y maximizar los posibles ingresos de un producto terminado.

### *Paso 4: Restricciones en la cadena de suministro*

Las restricciones en un modelo de optimización son aquellas limitaciones que atenúan el logro de los objetivos debido a cantidades limitadas de mano de obra, materiales y recursos financieros. En las cadenas de suministro existe otro grupo de restricciones muy vinculadas con las políticas de abastecimiento, producción y distribución. Un ejemplo de ello puede ser que un conjunto de suministradores solo pueda proveer a una planta de producción única y de igual forma esa planta solo pueda distribuir a un cliente en especial. Dentro del grupo de restricciones más comunes para el tipo de cadena de suministro que se está utilizando se encuentran:

- Restricciones de distribución: Definen el cumplimiento de la demanda que puede servirse con la proporción de flujos de distribución pero también la demanda puede ser incumplida.
- Restricciones de procesamiento y emplazamiento: Expresan las posibles ubicaciones de las plantas a localizar y las condiciones para ello.

- Restricciones de abastecimiento: Definen el flujo de materiales desde la fuente de origen de suministro hasta la planta de producción, de manera que como mínimo se garantice cumplir con la capacidad de producción.

### **Etapa 3: Construcción del modelo de optimización para la cadena de suministro bajo restricciones financieras**

Tener en cuenta aspectos financieros en la optimización de este tipo de problema permite que no resulten soluciones imposibles de implementar por falta de recursos monetarios, o sea, se va a obtener la mejor solución que se puede adoptar con el capital del que se dispone.

Ese capital disponible en las organizaciones para invertir en activos es denominado capital de trabajo. La administración del capital de trabajo posibilita la obtención de resultados favorables desde el punto de vista económico financiero.

El balance general es una fotografía instantánea de la situación financiera de la empresa por lo tanto para analizar este elemento financiero hay que tener en cuenta múltiples periodos de tiempo. Durante la modelación de la cadena, el capital de trabajo se incluye como un conjunto de restricciones en base al alcance del sistema definido a modelar y se parte de un estado financiero inicial.

#### **2.3. Fase II: Decisión final**

Para tomar la decisión final es necesario realizar un análisis de post-optimalidad a la solución óptima resultante del modelo propuesto.

#### **Solución óptima**

En la solución del problema de diseño de cadenas de suministro es más usual utilizar métodos de solución exactos, aunque en la literatura científica se recomienda el uso de métodos aproximados para grandes formulaciones del problema. En la presente investigación se utilizará el método Simplex para solucionar la modelación lineal entera mixta propuesta.

#### **Análisis de post-optimalidad en las decisiones**

Las decisiones de optimización dentro de la cadena de suministro muestran gran heterogeneidad respecto a su jerarquía y alcance. En las cadenas se tratan de optimizar decisiones operativas como el flujo de materiales a seguir en un día, hasta en dónde ubicar una instalación que permanecerá en un espacio geográfico determinado por largos periodos de tiempo. La combinación de todas estas decisiones en un modelo de optimización único, conduce a analizar qué variabilidad pudiera presentar la función

objetivo definida respecto a cambios inminentes que pueden tener lugar en un horizonte de tiempo. Máxime si el modelo de optimización implica decisiones las cuales se analizará su efectividad para largos periodos de tiempo.

#### **2.4. Conclusiones parciales**

1. El procedimiento propuesto permite organizar la formulación del diseño de cadenas de suministro directas, permitiendo desarrollar un proceso de toma de decisiones fundamentados científicamente, permitiendo identificar las variables de decisión y, restricciones típicas durante el modelado.

2. Considerar restricciones financieras durante el modelado de cadenas de suministro permite que las decisiones de configuración de la cadena no deterioren el estado financiero de las organizaciones que la componen.

# CAPÍTULO III APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PROPUESTO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DIRECTA TENIENDO EN CUENTA EL CAPITAL DE TRABAJO EN UN CASO DE ESTUDIO

## 3.1 Introducción

En el presente Capítulo se aplican parcialmente las etapas y pasos del procedimiento descrito en el Capítulo II, lográndose asistir el proceso relativo a la toma de decisiones para la optimización de la mejor configuración en los flujos, cantidad y ubicación de instalaciones, y donde será más económico almacenar (en los suministradores, en las plantas, en ambos), penalizando a la función objetivo por demanda insatisfecha de los clientes.

## 3.2. Fase I: Modelación de la cadena de suministro

La pertinencia del modelo matemático propuesto se comprobará a través de un caso de estudio. Se quiere lograr un diseño de una cadena de suministro directa que permita seleccionar la ubicación óptima de las plantas considerando el capital de trabajo con que se cuenta y que maximice los beneficios.

### 3.2.1. Identificación del esquema de la cadena de suministro

Se pretende localizar un máximo de hasta dos plantas partiendo de la existencia de cuatro zonas posibles de ubicación. En el caso de estudio se cuenta con tres suministradores y tres clientes de los que se conoce su ubicación.

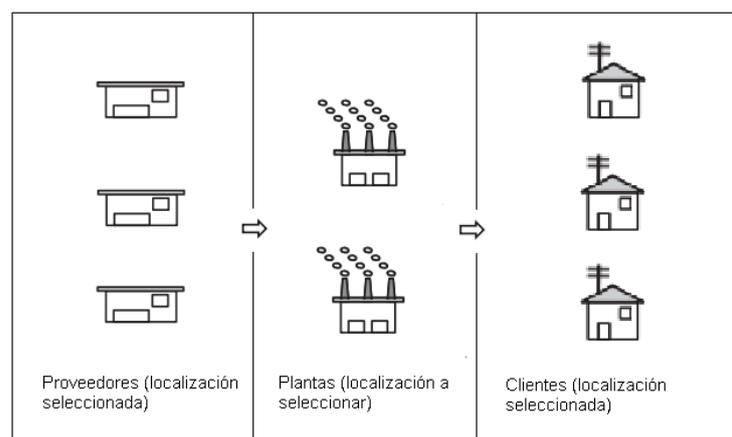


Figura 3.1. Esquema de la cadena de suministro para el caso de estudio

### 3.2.2. Modelo de optimización matemático

Para modelar el diseño de la cadena de suministro directa objeto de estudio, se utiliza la programación lineal entera mixta, debido a que el modelo tiene un carácter lineal.

### Etapa 1: Diseño de la cadena de suministro

A continuación se presenta el diseño de la cadena de suministro para el caso de estudio que se analiza.

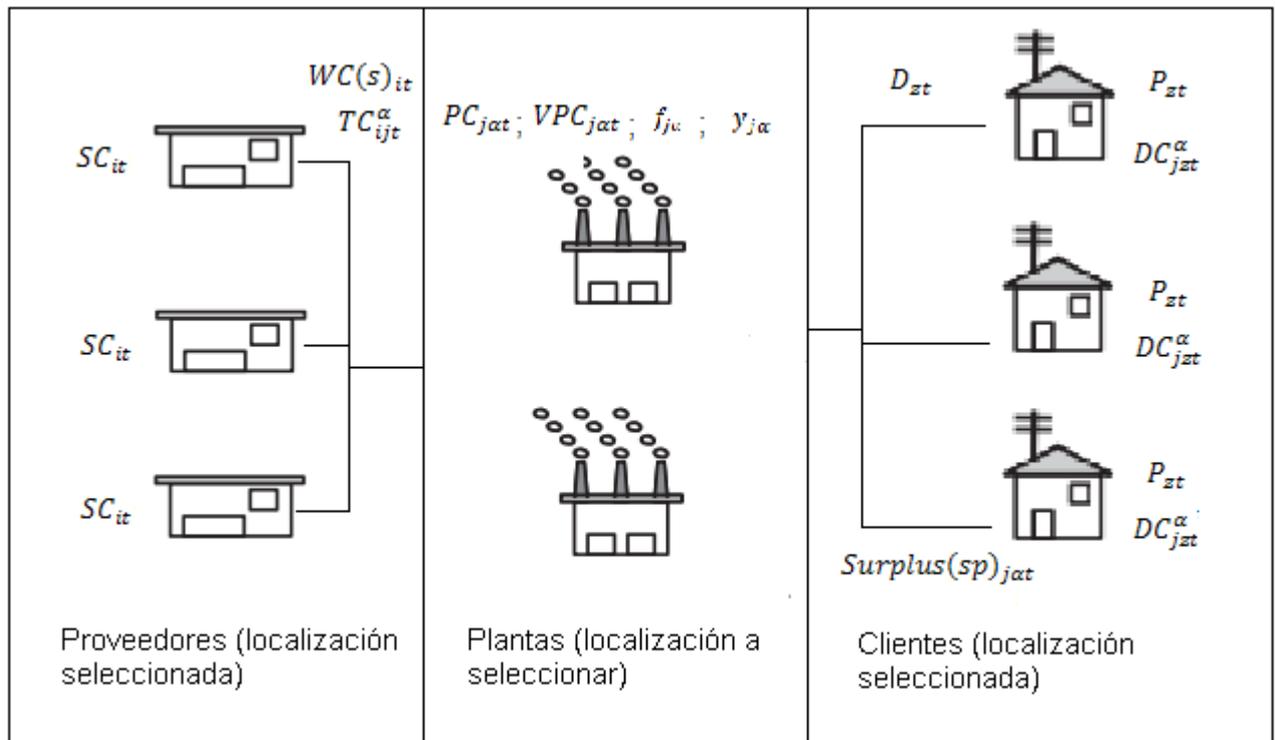


Figura 3.2. Diseño de la cadena de suministro para el caso de estudio

### Etapa 2: Construcción del modelo de optimización para la cadena de suministro

Para la construcción del modelo de optimización se tuvieron en cuenta los pasos que se enumeran a continuación.

#### Paso 1: Definición de las premisas en el modelo

El modelo de optimización está sujeto a las siguientes premisas:

- La oferta del proveedor puede enviarse a las plantas o puede guardarse en el almacén;
- Un proveedor puede ofrecer a varias plantas;
- Una planta puede recibir de diferentes proveedores;
- La producción en las plantas puede ser ofrecida a cualquier cliente o almacenada;
- Una planta sólo puede establecerse en una región y viceversa;
- Cuando una planta es abierta tiene dos costo asociados: el fijo y el operacional;

- Hay una multa a la función objetivo debido a la demanda insatisfecha;
- El costo de almacenamiento de las materias primas y del producto terminado es considerado igual.

**Paso 2: Definición de variables de decisión**

Las variables de decisión y los parámetros asociados según los subsistemas logísticos se muestran a continuación. El despliegue de cada una de las variables, representadas mediante matrices se muestra en anexo I.

**I. Subsistema de abastecimiento:**

Las variables de decisión asociadas a este subsistema son las siguientes:

$SR_{ijt}^\alpha$ : El caudal de suministro del proveedor  $i$  para planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

$Surplus(s)_{it}$ : Cantidad a ser guardada en el almacén del proveedor  $i$  en el periodo  $t$ .

Los parámetros que describen estas variables son:

$SC_{it}$ : Capacidad en el almacén del proveedor  $i$  en el periodo  $t$ .

**Tabla 3.1. Capacidad en el almacén del proveedor  $i$  en el periodo  $t$**

	Proveedor		
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$t = 1$	50	15	21
$t = 2$	20	5	2

$WC(s)_{it}$ : Costo de almacenamiento para el proveedor  $i$  en el periodo  $t$

**Tabla 3.2. Costo de almacenamiento para el proveedor  $i$  en el periodo  $t$**

	Proveedor		
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$t = 1$	1	3	2
$t = 2$	1	3	2

$TC_{ijt}^\alpha$ : Costo de transportación del proveedor  $i$  a la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

Tabla 3.3. Costo de transportación del proveedor  $i$  a la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

t = 1					
$\alpha = 1$			$\alpha = 2$		
$i \setminus j$	1	2	$i \setminus j$	1	2
1	2	1	1	1	1
2	1	3	2	2	1
3	4	5	3	2	3
$\alpha = 3$			$\alpha = 4$		
$i \setminus j$	1	2	$i \setminus j$	1	2
1	2	3	1	4	1
2	5	1	2	6	3
3	6	7	3	7	1
t = 2					
$\alpha = 1$			$\alpha = 2$		
$i \setminus j$	1	2	$i \setminus j$	1	2
1	2	1	1	1	1
2	1	3	2	2	1
3	4	5	3	2	3
$\alpha = 3$			$\alpha = 4$		
$i \setminus j$	1	2	$i \setminus j$	1	2
1	2	3	1	4	1
2	5	1	2	6	3
3	6	7	3	7	1

II. **Subsistema de producción:**

$PR_{jat}$ : El caudal de producción de la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

$Surplus(sp)_{jat}$ : La cantidad de materias primas a ser almacenada en la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

$Surplus(pc)_{jat}$ : Cantidad de producto terminado a ser almacenado en la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

$$y_{j\alpha} = \begin{cases} 1 & \text{si la planta } j \text{ es ubicada en la región } \alpha \\ 0 & \text{otro modo} \end{cases}$$

Parámetros asociados:

$VPC_{jat}$ : Costo variable de producción de la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

**Tabla 3.4. Costo variable de producción de la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$**

t = 1				
j \ \alpha	1	2	3	4
1	2	3	1	1
2	2	3	4	6
t = 2				
j \ \alpha	1	2	3	4
1	3	5	1	2
2	1	7	3	4

$f_{j\alpha}$ : Costo fijo por establecer la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$ .

**Tabla 3.5. Costo fijo por establecer la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$**

j \ \alpha	1	2	3	4
1	10	11	12	20
2	13	15	12	17

$mnop$ : El número máximo de plantas para el estudio se establece igual a 2.

$WC(p)_{jat}$ : Costo de almacenamiento para la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

**Tabla 3.6. Costo de almacenamiento para la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$**

t = 1				
j \ \alpha	1	2	3	4
1	2	1	2	1
2	3	4	4	1

t = 2				
j \ α	1	2	3	4
1	2	1	2	1
2	3	4	4	1

$PC_{jat}$ : La capacidad de producción de la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

**Tabla 3.8. La capacidad de producción de la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$**

t = 1				
j \ α	1	2	3	4
1	23	20	15	30
2	40	36	31	25
t = 2				
j \ α	1	2	3	4
1	23	20	15	30
2	40	36	31	25

$WP_{jat}$ : Capacidad de almacenamiento de la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .

**Tabla 3.9. Capacidad de almacenamiento de la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  en el periodo  $t$ .**

t=1				
j \ α	1	2	3	4
1	30	28	25	45
2	50	45	40	35
t=2				
j \ α	1	2	3	4
1	30	28	25	45
2	50	45	40	35

**III. Subsistema de distribución:**

$DR_{jzt}^\alpha$ : El caudal de distribución de la planta  $j$ , localizada en la región  $\alpha$  al cliente  $z$  en el periodo  $t$ .

$Slack(c)_{zt}$ : La demanda incumplida en el cliente  $z$  en el periodo  $t$ .

Parámetros asociados:

$DC_{jz}^\alpha$ : Costo de distribución de la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  al cliente  $z$  en el periodo  $t$ .

**Tabla 3.10. Costo de distribución de la planta  $j$  localizada en la región  $\alpha$  al cliente  $z$  en el periodo  $t$**

t = 1								
$\alpha = 1$				$\alpha = 1$				
j \ z	a	b	c	j \ z	a	b	c	
1	3	5	7	1	9	6	3	
2	1	6	2	2	4	1	2	
$\alpha = 1$				$\alpha = 1$				
j \ z	a	b	c	j \ z	a	b	c	
1	1	1	3	1	1	3	6	
2	4	7	5	2	1	3	5	
t = 2								
$\alpha = 1$				$\alpha = 1$				
j \ z	a	b	c	j \ z	a	b	c	
1	3	5	7	1	9	6	3	
2	1	6	2	2	4	1	2	
$\alpha = 1$				$\alpha = 1$				
j \ z	a	b	c	j \ z	a	b	c	
1	1	1	3	1	1	3	6	
2	4	7	5	2	1	3	5	

$UFDC_{zt}$ : Costo de la demanda incumplida al cliente  $z$  en el periodo  $t$ .

**Tabla 3.11. Costo de la demanda incumplida al cliente  $z$  en el periodo  $t$ .**

t=1		
z = a	z = b	z = c
4	10	1
t = 2		
z = a	z = b	z = c

4	10	5
---	----	---

$D_{zt}$ : La demanda de cada cliente  $z$  en el periodo  $t$ .

**Tabla 3.12. La demanda de cada cliente  $z$  en el periodo  $t$**

t = 1		
z = a	z = b	z = c
10	14	7
t = 2		
z = a	z = b	z = c
8	14	15

$P_{zt}$ : Precio para cada cliente  $z$  en el periodo  $t$  (ver tabla 3.13).

### Paso 3: Establecimiento de la función(s) objetivo

La función objetivo establecida es para maximizar beneficios como se muestra en la expresión 1, las entradas se calculan mediante expresión 2 y en el caso de los costos, en cada una de las partidas establecidas, se determinan utilizando las expresiones de la 4 a la 10.

**Tabla 3.13. Precio para cada cliente  $z$  en el periodo  $t$**

t = 1		
z = a	z = b	z = c
25	23	21
t = 2		
z = a	z = b	z = c
30	23	15

$$\text{Max (Benefit)} = \text{Incoming} - \text{Costs} \quad (1)$$

$$\text{Incoming} = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{z=a}^Z \sum_{\alpha=1}^W DR_{jzt}^{\alpha} \cdot P_{zt} \quad (2)$$

$$\text{Costs} = \text{Warehousing}(s) + \text{Transportation}(s - p) + \text{Production} + \text{Warehousing}(sp + pc) + \text{Plant Establishment} + \text{Distribution}(p - c) + \text{Unfulfilled demand} \quad (3)$$

$$\text{Warehousing}(s) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \text{Surplus}(s)_{it} \cdot WC(s)_{it} \quad (4)$$

$$\text{Transportation}(s - p) = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W SR_{ijt}^{\alpha} \cdot TC_{ijt}^{\alpha} \quad (5)$$

$$Production = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W PR_{j\alpha t} \cdot VPC_{j\alpha t} \quad (6)$$

$$Warehousing (sp + pc) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W \{ [Surplus(sp)_{j\alpha t} + Surplus(pc)_{j\alpha t}] \cdot WC(p)_{j\alpha t} \} \quad (7)$$

$$Plant Establishment = \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W y_{j\alpha} \cdot f_{j\alpha} \quad (8)$$

$$Distribution(p - c) = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{z=1}^Z \sum_{\alpha=1}^W DR_{j\alpha t}^z \cdot DC_{j\alpha t}^z \quad (9)$$

$$Unfulfilled demand = \sum_{t=1}^T \sum_{z=1}^Z Slack(c)_{zt} \cdot UFDC_{zt} \quad (10)$$

#### Paso 4: Restricciones en la cadena de suministro

En cuanto al subsistema de aprovisionamiento se definieron dos restricciones, expresiones 11 y 12, la primera asegura que la capacidad del suministro debe enviarse y/o debe guardarse en el almacén del proveedor y la segunda afirma que los flujos de materiales del proveedor pueden usarse para la producción o pueden guardarse en el almacén de la planta.

$$Surplus(s)_{it-1} + SC_{it} = \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W SR_{ij\alpha t}^{\alpha} + Surplus(s)_{it}, \quad \forall i, t: i = 1, \dots, I; t = 1, \dots, T \quad (11)$$

$$Surplus(sp)_{j\alpha t-1} + \sum_{i=1}^I SR_{ij\alpha t}^{\alpha} = PR_{j\alpha t} + Surplus(sp)_{j\alpha t}, \quad \forall j, \alpha, t: j = 1, \dots, J; \alpha = 1, \dots, W; t = 1, \dots, T \quad (12)$$

Las expresiones que restringen el subsistema de producción están agrupadas de la 13 a la 17. La restricción 13 expresa que la proporción de la producción no debe exceder la capacidad de producción de planta  $i$  en el periodo  $t$  en caso de ser establecida. En las premisas del modelo se definió que se ubicaría una planta por región y en una región solo puede localizarse una planta lo cual se logra con las restricciones mostradas en expresiones 14 y 15. El número de planta a ser localizado está limitado por un número máximo de posibles plantas, expresión 16. La expresión 17 indica que las materia primas y los productos terminados que van a ser almacenados en las plantas tienen una limitación de almacenamiento.

$$PR_{j\alpha t} \leq PC_{j\alpha t} \cdot y_{j\alpha}, \quad \forall j, \alpha, t: j = 1, \dots, J; \alpha = 1, \dots, W; t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$\sum_{\alpha=1}^W y_{j\alpha} = 1, \quad \forall j, t: j = 1, \dots, J; t = 1, \dots, T \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jat} \leq 1, \quad \forall \alpha, t: \alpha = 1, \dots, W; t = 1, \dots, T \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{\alpha}^W y_{j\alpha} \leq mnop \quad (16)$$

$$Surplus(sp)_{jat} + Surplus(pc)_{jat} \leq WP_{jat} \cdot y_{j\alpha}, \quad \forall j, \alpha, t: j = 1, \dots, J; \alpha = 1, \dots, W; t = 1, \dots, T \quad (17)$$

Para el subsistema de distribución se establecieron dos restricciones la 18 y 19, la expresión 18, que establece que la proporción del flujo de distribución en el periodo  $t$  consiste en la proporción de la producción en el periodo  $t$  más lo que está almacenado en la planta en el periodo  $t$  y lo que quedó almacenado en esa planta en el periodo anterior. La expresión 19 establece que la demanda del cliente puede abastecerse con la proporción del flujo de distribución o puede ser incumplida.

$$PR_{jat} = \sum_{z=a}^Z DR_{jzt}^{\alpha} + Surplus(pc)_{jat} - Surplus(pc)_{jat-1}, \quad \forall j, \alpha, t: j = 1, \dots, J; \alpha = 1, \dots, W; t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$D_{zt} = \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W DR_{jzt}^{\alpha} + Slack(c)_{zt}, \quad \forall z, t: z = a, \dots, Z; t = 1, \dots, T \quad (19)$$

Las restricciones 20 y 21 son las relacionadas con la no negatividad de las variables continuas y la condición de la variable binaria.

$$SR_{ijt}^{\alpha}, Surplus(s)_{it}, PR_{jat}, Surplus(sp)_{jat}, Surplus(pc)_{jat}, DR_{jzt}^{\alpha}, Slack(c)_{zt} \geq 0 \quad \forall i, j, \alpha, z, t \quad (20)$$

$$y_{j\alpha} \in \{0,1\} \quad \forall j, \alpha \quad (21)$$

### **Eta 3: Construcción del modelo de optimización para la cadena de suministro considerando el capital de trabajo**

Durante la modelación de la cadena, el capital de trabajo se tuvo en cuenta para los suministradores y las plantas partiendo de un estado financiero inicial y se incluye como un conjunto de restricciones en base al alcance del sistema definido a modelar.

Los parámetros asociados a las nuevas restricciones son los siguientes:

$Wk(s)_t$ : Capital de trabajo de los suministradores en el periodo  $t$ .

$Wk(p)_t$ : Capital de trabajo de las plantas en el periodo  $t$ .

$AC(s)$ : Total de activos circulantes de los suministradores.

$WI$ : Inversión en inventario de los suministradores.

$DR(s)$ : Tasa de depreciación del inventario de los suministradores.

$DR(p)$ : Tasa de depreciación de las plantas.

$VI$ : Valor de inventario.

$PV(s)$ : Total de pasivos de los suministradores.

$PV(p)$ : Total de pasivos de las plantas.

$P_s$ : Precio de venta de los suministradores.

**Tabla 3.14. Estado financiero inicial para los suministradores y plantas**

Hoja de balance inicial de los suministradores		Hoja de balance inicial de las plantas	
Activos circulantes	\$	Activos circulantes	
activos intangibles:	12	activos intangibles:	10
efectivo actual:	193	efectivo actual:	130
cuentas por cobrar:	73	cuentas por cobrar:	32
inventario inicial:	15	inventario inicial:	21
TOTAL DE ACTIVOS	293	TOTAL DE ACTIVOS	293
<b>Pasivos circulantes</b>		<b>Pasivos circulantes</b>	
Deudas a mediano plazo:	221	Deudas a mediano plazo:	221
TOTAL DE PASIVOS	221	TOTAL DE PASIVOS	221
Otros parámetros financieros		Otros parámetros financieros	
Precio de venta:	6	Valor del inventario:	15
Tasa de depreciación:	0,001	Tasa de depreciación:	0,02
Inversión en almacén:	200	Capital de trabajo:	\$500
Capital de trabajo:	\$100		

Las restricciones de la 22 a la 25 son las relacionadas con el capital de trabajo.

$$\begin{aligned}
 Wk(s)_1 = & \left\{ AC(s) + \left( \sum_{j=1}^J \sum_{z=\alpha}^Z \sum_{\alpha=1}^W SR_{ijt}^{\alpha} + \sum_{i=1}^I Surplus(s)_{it} \right) \cdot PS \right\} \\
 & - \left\{ PV(s) + WI \cdot DR(s) \right. \\
 & \left. + \sum_{i=1}^I [Surplus(s)_{it} \cdot WS(s)_{it}] + \sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^I \sum_{\alpha=1}^W [SR_{ijt}^{\alpha} \cdot TC_{ijt}^{\alpha}] \right\} \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$Wk(s)_2 = \left\{ Wk(s)_{t-1} \left( \sum_{j=1}^J \sum_{z=a}^z \sum_{\alpha=1}^W SR_{ijt}^\alpha + \sum_{i=1}^I Surplus(s)_{it} \right) \cdot PS \right\} \\ - \left\{ WI \cdot DR(s) + \sum_{i=1}^I [Surplus(s)_{it} \cdot WS(s)_{it}] + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{\alpha=1}^W [SR_{ijt}^\alpha \cdot TC_{ijt}^\alpha] \right\} \quad (23)$$

$$Wk(p)_1 = \left\{ AC(p) + \sum_{j=1}^J \sum_{z=a}^z \sum_{\alpha=1}^W [DR_{jzt}^\alpha \cdot P_{zt}] \right\} + \left\{ \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W [Surplus(sp)_{jat} + Surplus(pc)_{jat}] \cdot VI \right\} \\ - \left\{ PV(p) + \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W [y_{jat} \cdot f_{jat}] \cdot DR(p) + \sum_{j=1}^J \sum_{z=a}^z \sum_{\alpha=1}^W [DR_{jzt}^\alpha \cdot DC_{jzt}^\alpha] \right. \\ + \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W [Surplus(sp)_{jat} + Surplus(pc)_{jat}] \cdot WC(p)_{jat} \\ \left. + \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W [PR_{jat} \cdot VPC_{jat}] + \sum_{j=1}^J \sum_{z=a}^z \sum_{\alpha=1}^W [SR_{ijt}^\alpha \cdot P_s] \right\} \quad (24)$$

$$Wk(p)_2 = (Wk(p)_{t-1} \sum_{j=1}^J \sum_{z=a}^z \sum_{\alpha=1}^W [DR_{jzt}^\alpha \cdot P_{zt}] + \left\{ \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W [Surplus(sp)_{jat} + Surplus(pc)_{jat}] \cdot VI \right\}) \\ - \left\{ \sum_{j=1}^J \sum_{z=a}^z \sum_{\alpha=1}^W [DR_{jzt}^\alpha \cdot DC_{jzt}^\alpha] + \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W [Surplus(sp)_{jat} + Surplus(pc)_{jat}] \cdot WC(p)_{jat} \right. \\ \left. + \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W [y_{jat} \cdot f_{jat}] \cdot DR(p) + \sum_{j=1}^J \sum_{\alpha=1}^W [PR_{jat} \cdot VPC_{jat}] + \sum_{j=1}^J \sum_{z=a}^z \sum_{\alpha=1}^W [SR_{ijt}^\alpha \cdot P_s] \right\} \quad (25)$$

### 3.3. Fase II: Decisión final

En la presente etapa se solucionan los modelos de optimización sin restricciones financieras y con ellas. Finalmente se realiza una comparación entre ambos modelos como forma de comprobar la hipótesis de investigación.

#### 3.3.1. Solución óptima sin considerar capital de trabajo

El modelo propuesto fue solucionado utilizando el software WinQSB, véase anexo II, en la tabla 3.15. se muestra la configuración óptima sin tener en cuenta el aspecto financiero. El modelo cuenta con 156 variables continuas, 8 variables binarias y 83 restricciones de flujo material. El horizonte de planificación es de dos periodos de tiempo considerando cada periodo de un año.

**Tabla 3.15. Solución óptima al modelo sin capital de trabajo**

Periodo 1						
	PL1	PL2		Ca	Cb	Cc
S1	14	2	PL1	-	14	-

S2	-	-	PL2			
S3	-	15		10	-	7
Periodo 2						
	PL1	PL2		Ca	Cb	Cc
S1	14	23	PL1	-	14	-
S2	-	-	PL2	8	-	15
S3	-	-				
<b>BENEFICIO</b>						
			\$1026.00			
<b>Ingreso</b>			\$1506.00			
Costo almacenamiento(s)			\$154.00			
Costo transportación (s-p)			\$126.00			
Costo producción			\$85.00			
Costo almacenamiento (p)			\$0.00			
Establecimiento planta			\$25.00			
Costo distribución			\$90.00			
Costo demanda insatisfecha			\$0.00			
<b>Costo Total</b>			\$480.00			

Se localizaron dos plantas, la planta 1 se localizó en la región 3 y la planta 2 en la región 1. El suministrador 1 almacenó 34 unidades y distribuyó 2 unidades a la planta 2 y 14 a la planta 1 y el suministrador 3 almacenó 21 unidades y distribuyó 15 unidades a la planta 2 en el periodo 1; mientras que en el periodo 2 el suministrador 1 almacenó 17 unidades y distribuyó 23 unidades a la planta 2 y 14 a la planta 1, el suministrador 2 almacenó 5 unidades y el suministrador 3 23 unidades. La planta 1 produjo 14 unidades en ambos periodos y la planta 2 17 y 23 unidades en los periodos 1 y 2 respectivamente. La planta 1 distribuyó 14 unidades al cliente b y la planta 2 distribuyó 10 unidades al cliente a y 7 unidades al cliente c en el periodo 1; mientras que en el periodo 2 la planta 1 distribuyó 14 unidades al cliente b y la planta 2 distribuyó 8 unidades al cliente a y 15 unidades al cliente c. No se almacenó nada en las plantas y no hubo demanda insatisfecha en ningún periodo.

### 3.3.2 Solución óptima considerando capital de trabajo

El modelo propuesto fue solucionado utilizando el software WinQSB, véase anexo III, en la tabla 3.16. se muestra la configuración óptima teniendo en cuenta el capital de trabajo como aspecto financiero. El modelo cuenta con 160 variables continuas, 8 variables binarias y 87 restricciones de flujo material. El horizonte de planificación es de dos periodos de tiempo considerando cada periodo de un año.

**Tabla 3.16. Solución óptima al modelo con capital de trabajo**

Periodo 1						
	PL1	PL2		Ca	Cb	Cc
S1	15	1	PL1	1	14	-
S2	-	15	PL2	9	-	7
S3	-	-				
Periodo 1						
	PL1	PL2		Ca	Cb	Cc
S1	14	23	PL1	-	14	-
S2	-	-	PL2	8	-	15
S3	-	-				
<b>BENEFICIO</b>				\$1010.833		
<b>Ingreso</b>				\$1506.00		
Costo almacenamiento(s)				\$138.8332		
Costo transportación (s-p)				\$157.333		
Costo producción				\$84.00		
Costo almacenamiento (p)				\$0.00		
Establecimiento planta				\$25.00		
Costo distribución				\$90.00		
Costo demanda insatisfecha				\$0.00		
<b>Costo Total</b>				<b>\$495.1662</b>		

Se localizaron dos plantas, la planta 1 se localizó en la región 3 y la planta 2 en la región 1. El suministrador 1 almacenó 34 unidades y distribuyó 1 unidad a la planta 2 y 15 a la planta 1 y el suministrador 2 distribuyó 15 unidades al planta 2 en el periodo 1; mientras que en el periodo 2 el suministrador 1 almacenó 17 unidades y distribuyó 23 unidades a la planta 2 y 14 a la planta 1, el suministrador 2 almacenó 5 unidades y el suministrador 3 23 unidades. La planta 1 produjo 15 y 14 unidades en los periodos 1 y 2 respectivamente y la planta 2 16 y 23 unidades en los periodos 1 y 2 respectivamente. La planta 1 distribuyó 1 unidad al cliente a y 14 unidades al cliente b y la planta 2 distribuyó 9 unidades al cliente a y 7 unidades al cliente c en el periodo 1; mientras que en el periodo 2 la planta 1 distribuyó 14 unidades al cliente b y la planta 2 distribuyó 8 unidades al cliente a y 15 unidades al cliente c. No se almacenó nada en las plantas y no hubo demanda insatisfecha en ningún periodo.

### 3.4. Conclusiones parciales

1. El modelo propuesto permite establecer la configuración de cadenas de suministro directas al incluir decisiones como cantidad y localización de instalaciones,

configuración de los flujos materiales entre los eslabones de la cadena y donde será más económico almacenar.

**2.** Al incluir el capital de trabajo como restricción se obtiene la mejor solución que se puede adoptar con el capital con que se dispone.

## **Conclusiones Generales**

- 1.** La investigación propone un procedimiento general para optimizar el diseño de cadenas de suministro teniendo en cuenta simultáneamente el flujo material y el capital de trabajo como una consideración del flujo financiero.
- 2.** Se aplicó parcialmente el procedimiento propuesto a un caso de estudio que permitió establecer la configuración de cadenas de suministro directas bajo restricciones que incluyen el flujo material y el capital de trabajo como aspecto financiero.

## **Recomendaciones**

- 1.** Realizar un análisis de sensibilidad para completar la aplicación del procedimiento propuesto.
- 2.** Considerar incertidumbre en la demanda, en los suministradores y en los parámetros de entrada de la modelación.
- 3.** Introducir restricciones relacionadas con las razones financieras en el modelo y considerar más periodos de tiempo.
- 4.** Considerar cadenas multiproducto y varias funciones objetivos.
- 5.** Utilizar estrategias aproximadas como algoritmo de solución a problemas de gran escala y/o utilizar software especializado para la solución del modelo según la complejidad del mismo.
- 6.** Probar la efectividad del modelo aplicándolo a una situación empresarial real.

## Bibliografía

- Acevedo Suárez, J. A., Urquiaga Rodríguez, Ana Julia Y Gómez Acosta, Marta Inés 2001. *Gestión de la cadena de suministro*, Ciudad de la Habana, Centro de Estudio Tecnología de Avanzada (CETA) y Laboratorio de Logística y Gestión de la Producción (LOGESPRO).
- Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L. & Karaoglan, I. 2009. A steady-state genetic algorithm for multi-product supply chain network design. *Computers & Industrial Engineering*, 56, 521-537.
- Amin, S. H. & Zhang, G. 2013. A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 4165-4176.
- Arntzen, B. C., Brown, G. G., Harrison, T. P. & Trafton, L. L. 1995. Global supply chain management at Digital Equipment Corporation. *Interfaces*, 25, 69-93.
- Azaron, A., Furmans, K. & Modarres, M. 2009. Interactive multi-objective stochastic programming approaches for designing robust supply chain networks. *Operations Research Proceedings 2008*. Springer.
- Badell, M., Romero, J., Huertas, R., Puigjaner, L. 2004. Planning, scheduling and budgeting value-added chains. *Computers and Chemical Engineering* 28, 45–61.
- Ballou, H. R. 1991. *La logística empresarial, Control y Planificación*, Madrid, Ediciones Díaz Santos.
- Ballou, R. H. 2004. *Logística: Administración de la Cadena de Suministros*, 5ª Edición, Edit. Mc Graw Hill, México.
- Ballou, R. H. 2005. *Logística: Administración de la cadena de suministro*, México, Pearson Educación.
- Blanchard, B. 1998. *Logistics Engineering and Management*, USA, Prentice Hall.
- Bowersox, D. J. 1979. *Towards Total Logistical Management*, Wentworth, Gower Press.
- CLARKSTON. 2000. Supply Chain Management Primer. Available: <http://www.clarkstongroup.com>.
- CSCMP. 2014. *Supply Chain Management and Logistics Management Definitions* [Online]. Council of Supply Chain Management Professional. Available: <http://www.cscmp.org/Website/AboutCSCMP/Definitions/Definitions.asp>.

- Christopher, M. L. 1999. Supply Chain Strategy: Its Impact on Shareholder Value. *The International Journal of Logistics Management*, 10, 1-10.
- D Simchi-Levi, S. I., KI Luangkesorn, 2004. A general decomposition algorithm for parallel queues with correlated arrivals. *Queueing Systems*, 47, 313–344.
- Daskin, M. S., Coullard, C. R. & Shen, Z.-J. M. 2002. An inventory-location model: Formulation, solution algorithm and computational results. *Annals of operations Research*, 110, 83-106.
- Esteves, V. M., Sousa, J. M., Silva, C. A., Povoá, A. P. & Gomes, M. I. SCant-design: Closed loop supply chain design using ant colony optimization. Evolutionary Computation (CEC), 2012 IEEE Congress on, 2012. IEEE, 1-8.
- Franca, R. B., Jones, E. C., Richards, C. N. & Carlson, J. P. 2010. Multi-objective stochastic supply chain modeling to evaluate tradeoffs between profit and quality. *International Journal of Production Economics*, 127, 292-299.
- Georgiadis, M. C., Tsiakis, P., Longinidis, P. & Sofioglou, M. K. 2011. Optimal design of supply chain networks under uncertain transient demand variations. *Omega*, 39, 254-272.
- Gitman, L. 2006. *Fundamentos de Administración Financiera*, La Habana, Editorial Félix Valera.
- Glover, F. 1977. Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision Sciences*, 8, 156-166.
- Guillén, G., Badell, M., Espuña, A., Puigjaner, L. 2006. Simultaneous optimization of process operations and financial decisions to enhance the integrated planning/scheduling of chemical supply chains. *Computers and Chemical Engineering*, 30, 421–436.
- Hammami, R., Frein, Y., Hadj-Alouane, A.B. 2008. Supply chain design in the delocalization context: relevant features and new modeling tendencies. *International Journal of Production Economics*, 113, 641–656.
- Hammami, R., Frein, Y., Hadj-Alouane, A.B. 2009. A strategic-tactical model for the supply chain design in the delocalization context: mathematical formulation and a case study. *International Journal of Production Economics* 122, 351–365.
- Hooker, J. 1995. Testing heuristics: We have it all wrong. *Journal of Heuristics*.
- Ing. José M. Trujillo, I. J. A. D. 1983. *Métodos económicos-matemáticos*, La Habana.

- Javid Aa, A. N. 2010. Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research: Part E*, 46, 582–97.
- Keyvanshokoo, E., Fattahi, M., Seyed-Hosseini, S. & Tavakkoli-Moghaddam, R. 2013. A dynamic pricing approach for returned products in integrated forward/reverse logistics network design. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 10182-10202.
- Klibi, W., Martel, A., Guitouni, A. 2010. The design of robust value-creating supply chain networks: a critical review. *European Journal of Operational Research*, 203, 283-293.
- Knudsen González, J. 2005. *Diseño y gestión de la cadena de suministro de los residuos agroindustriales de la caña de azúcar. Aplicados a los residuos agroindustriales cañeros, el bagazo y las mieles*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara.
- Ko, H. J. & Evans, G. W. 2007. A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers & Operations Research*, 34, 346-366.
- Lainez, J. M., Guillén, G., Badell, M., Espuña, A., Puigjaner, L. 2007. Enhancing corporate value in the optimal design of chemical supply chains. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46, 7739–7757.
- Lalonde, B. J., Grabner, J.R. 1971. New dimensions in integrated distribution management. *Freight Management*.
- Listeş, O. & Dekker, R. 2005. A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160, 268-287.
- Logística, C. E. D. 2003. Diccionario de términos y definiciones logísticas. España.
- Longinidis P, G. M. 2011. Integration of financial statement analysis in the optimal design of supply chain network sunderdemand uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 129, 262–76.
- Magee, J. 1960. *Industrial Logistics, Management*, Michigan State University.
- Marrero Delgado, F. 2001. *Procedimiento para la toma de decisiones logísticas con enfoque multicriterio en la cadena de corte, alza y tiro de la caña de azúcar. Aplicaciones en la provincia de Villa Clara*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas., Universidad Central Marta Abreu de Las Villas.

- Melo, M. T., Nickel, S., Saldanha-Da-Gama, F., 2009. Facility location and supply chain management—a review. *European Journal of Operational Research*, 196, 401-412.
- Mentzer, J. E. A. 2001. Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics*, 22, 1-25.
- Meyr, H., Wagner, M. & Rohde, J. 2002. Structure of advanced planning systems. *Supply Chain Management and Advanced Planning*. Springer.
- Mier, M. Á. O. Tipología de flujos en la Logística Inversa. V Congreso de Ingeniería de Organización, 2003.
- Olivares-Benitez E, G.-V. J., Ríos-Mercado Rz 2012. A supply chain design problem with facility location and bi-objective transportation choices. *TOP*, 20, 729–53.
- Osman, H. & Demirli, K. 2010. A bilinear goal programming model and a modified Benders decomposition algorithm for supply chain reconfiguration and supplier selection. *International Journal of Production Economics*, 124, 97-105.
- Papageorgiou, L. G. 2008. Supply chain optimisation for the process industries: advances and opportunities. *Computers and Chemical Engineering*, 33, 1931–1938.
- Puigjaner, L., Guillén, G. 2008. Towards an integrated framework for supply chain management in the batch chemical process industry. *Computers and Chemical Engineering*, 33, 650–670.
- Qi, L. & Shen, Z. J. M. 2007. A supply chain design model with unreliable supply. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54, 829-844.
- Qi L, S. Z. 2007. A supply chain design model with unreliable supply. *Naval Research Logistics*, 54, 829–44.
- Reeves, C. 1996. Hybrid genetic algorithms for bin-packing and related problems. *Annals of Operations Research*.
- Reza Zanjirani Farahani, S. R., Tammy Drezner, Samira Fallah 2014. Competitive supply chain network design :An over view of classifications, models, solution techniques and applications. *Omega*, 45, 92-118.
- Ros, L., De La Fuente, M. V., Campuzano, F. & De Nieves, C. Modelo integrado de las Cadenas de Suministro Directa e Inversa\*. V Congreso de Ingeniería de Organización, 2003.
- Ross, S., Westerfield, R., Jordan, B 2006. *Fundamentals of Corporate Finance*, McGraw-Hill/Irwin, New York.

- Sabri, E. H. & Beamon, B. M. 2000. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28, 581-598.
- Salema, M. I. G., Ana Paula Barbosa-Povoa, Augusto Q. Novais 2010. Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, 203, 336-349.
- Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M. & Shapiro, A. 2005. A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167, 96-115.
- Schmidt, G. A. W., W.E. 2000. Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: a review and decision of modelling issues. *International Journal of Production Research* 38, 1501-1523.
- Shapiro, J. F. 2004. Challenges of strategic supply chain planning and modeling. *Computers and Chemical Engineering*, 28, 855–861.
- Shen, Z.-J. M. 2005. A multi-commodity supply chain design problem. *IIE Transactions*, 37, 753-762.
- Shen, Z.-J. M. & Daskin, M. S. 2005. Trade-offs between customer service and cost in integrated supply chain design. *Manufacturing & service operations management*, 7, 188-207.
- Shen, Z. 2007. Integrated supply chain design models: a survey and future research directions. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 3, 1-27.
- Shih, L.-H. 2001. Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources, conservation and recycling*, 32, 55-72.
- Shu, J., Teo, C.-P. & Shen, Z.-J. M. 2005. Stochastic transportation-inventory network design problem. *Operations Research*, 53, 48-60.
- Siarry, J. 2005. Métaheuristiques pour l'optimisation et auto-organisation dans les systèmes biologiques.
- Sodhi, M. S., Tang, C.S. 2009. Modeling supply-chain planning under demand uncertainty using stochastic programming: a survey motivated by assetliability management. *International Journal of Production Economics*, 121, 728–738.
- Standler H, K. C. 2008. *supply chain management and advance planning*, Berlin, Springer.
- Steiglitz, C. H. P. A. K. 1982. *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*, New York, Prentice - Hall.

- Talbi, E.-G. 2009. *Metaheuristics. From desing to implementation*, Wiley.
- Tsiakis, P., Papageorgiou, L.G. 2008. Optimal production allocation and distribution supply chain networks. *International Journal of Production Economics*, 111, 468–483.
- Üster, H., Easwaran, G., Akçali, E. & Cetinkaya, S. 2007. Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54, 890-907.
- Vidal, C. J. & Goetschalckx, M. 1997. Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98, 1-18.
- Wang, F., Lai, X. & Shi, N. 2011. A multi-objective optimization for green supply chain network design. *Decision Support Systems*, 51, 262-269.
- Weston J.Fred , E. B. 2000. *Fundamentos de Administración Financiera.*, Editorial MES.
- Wolsey, G. N. A. L. 1999. *Integer and Combinatorial Optimization*, Wiley.
- Xu, J., Liu, Q. & Wang, R. 2008. A class of multi-objective supply chain networks optimal model under random fuzzy environment and its application to the industry of Chinese liquor. *Information Sciences*, 178, 2022-2043.
- Yi, G., Reklaitis, G.V. 2004. Optimal design of batch-storage network with financial transactions and cash flows. *AIChE Journal*, 50, 2849–2865.
- You, F. & Grossmann, I. E. 2008. Design of responsive supply chains under demand uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 32, 3090-3111.

## Anexo I. Matrices de variables de decisión

<b>DRjzt(<math>\alpha</math>):</b> Distribution rate form plant j, located at region $\alpha$ , to customer z							
DRj1a1(1)	DRj2a1(1)	DRj1a1(2)	DRj2a1(2)	DRj1a1(3)	DRj2a1(3)	DRj1a1(4)	DRj2a1(4)
DRj1a2(1)	DRj2a2(1)	DRj1a2(2)	DRj2a2(2)	DRj1a2(3)	DRj2a2(3)	DRj1a2(4)	DRj2a2(4)
DRj1b1(1)	DRj2b1(1)	DRj1b1(2)	DRj2b1(2)	DRj1b1(3)	DRj2b1(3)	DRj1b1(4)	DRj2b1(4)
DRj1b2(1)	DRj2b2(1)	DRj1b2(2)	DRj2b2(2)	DRj1b2(3)	DRj2b2(3)	DRj1b2(4)	DRj2b2(4)
DRj1c1(1)	DRj2c1(1)	DRj1c1(2)	DRj2c1(2)	DRj1c1(3)	DRj2c1(3)	DRj1c1(4)	DRj2c1(4)
DRj1c2(1)	DRj2c2(1)	DRj1c2(2)	DRj2c2(2)	DRj1c2(3)	DRj2c2(3)	DRj1c2(4)	DRj2c2(4)

<b>SRijt(<math>\alpha</math>):</b> Caudal de suministro del proveedor i para planta j localizada en la región $\alpha$ en el periodo							
SR111(1)	SR121(1)	SR111(2)	SR121(2)	SR111(3)	SR121(3)	SR111(4)	SR121(4)
SR211(1)	SR221(1)	SR211(2)	SR221(2)	SR211(3)	SR221(3)	SR211(4)	SR221(4)
SR311(1)	SR321(1)	SR311(2)	SR321(2)	SR311(3)	SR321(3)	SR311(4)	SR321(4)
SR112(1)	SR122(1)	SR112(2)	SR122(2)	SR112(3)	SR122(3)	SR112(4)	SR122(4)
SR212(1)	SR222(1)	SR212(2)	SR222(2)	SR212(3)	SR222(3)	SR212(4)	SR222(4)
SR312(1)	SR322(1)	SR312(2)	SR322(2)	SR312(3)	SR322(3)	SR312(4)	SR322(4)

<b>DRjzt(<math>\alpha</math>):</b> Distribution rate form plant j, located at region $\alpha$ , to customer z					
DR1a1(1)	DR1b1(1)	DR1c1(1)	DR2a1(1)	DR2b1(1)	DR2c1(1)
DR1a1(2)	DR1b1(2)	DR1c1(2)	DR2a1(2)	DR2b1(2)	DR2c1(2)

DR1a1(3)	DR1b1(3)	DR1c1(3)	DR2a1(3)	DR2b1(3)	DR2c1(3)
DR1a1(4)	DR1b1(4)	DR1c1(4)	DR2a1(4)	DR2b1(4)	DR2c1(4)
DR1a2(1)	DR1b2(1)	DR1c2(1)	DR2a2(1)	DR2b2(1)	DR2c2(1)
DR1a2(2)	DR1b2(2)	DR1c2(2)	DR2a2(2)	DR2b2(2)	DR2c2(2)
DR1a2(3)	DR1b2(3)	DR1c2(3)	DR2a123)	DR2b2(3)	DR2c2(3)
DR1a2(4)	DR1b2(4)	DR1c2(4)	DR2a2(4)	DR2b2(4)	DR2c2(4)

<b>Y<sub>ja</sub>: The establishment of plant j at region α</b>							
Y <sub>11</sub>	Y <sub>12</sub>	Y <sub>13</sub>	Y <sub>14</sub>	Y <sub>21</sub>	Y <sub>22</sub>	Y <sub>23</sub>	Y <sub>24</sub>

<b>Slack(c)<sub>zt</sub>: Unfulfilled demand in the customer z</b>					
Slack(c) <sub>a1</sub>	Slack(c) <sub>a2</sub>	Slack(c) <sub>b1</sub>	Slack(c) <sub>b2</sub>	Slack(c) <sub>c1</sub>	Slack(C) <sub>c2</sub>

<b>Surplus(s)<sub>it</sub>: Cantidad a ser guardada en el almacén i del proveedor en el periodo t</b>					
Surplus (s) <sub>11</sub>	Surplus (s) <sub>21</sub>	Surplus (s) <sub>31</sub>	Surplus (s) <sub>12</sub>	Surplus (s) <sub>22</sub>	Surplus (s) <sub>32</sub>

<b>Surplus(sp)<sub>jat</sub>: Amount to be stored in the plant j located at region (alpha) (supplier-plant)</b>			
Surplus (SP) <sub>111</sub>	Surplus (SP) <sub>121</sub>	Surplus (SP) <sub>131</sub>	Surplus (SP) <sub>141</sub>
Surplus (SP) <sub>211</sub>	Surplus (SP) <sub>221</sub>	Surplus (SP) <sub>231</sub>	Surplus (SP) <sub>241</sub>
Surplus (SP) <sub>112</sub>	Surplus (SP) <sub>122</sub>	Surplus (SP) <sub>132</sub>	Surplus (SP) <sub>142</sub>
Surplus (SP) <sub>211</sub>	Surplus (SP) <sub>222</sub>	Surplus (SP) <sub>232</sub>	Surplus (SP) <sub>242</sub>

<b>Surplus(pc)<sub>jat</sub>: Amount to be stored in the plant j located at region (alpha) (plant-customer)</b>			
Surplus (PC) <sub>111</sub>	Surplus (PC) <sub>121</sub>	Surplus (PC) <sub>131</sub>	Surplus (PC) <sub>141</sub>
Surplus (PC) <sub>211</sub>	Surplus (PC) <sub>221</sub>	Surplus (PC) <sub>231</sub>	Surplus (PC) <sub>241</sub>
Surplus (PC) <sub>112</sub>	Surplus (PC) <sub>122</sub>	Surplus (PC) <sub>132</sub>	Surplus (PC) <sub>142</sub>
Surplus (PC) <sub>211</sub>	Surplus (PC) <sub>222</sub>	Surplus (PC) <sub>232</sub>	Surplus (PC) <sub>242</sub>

**Fuente: Elaboración propia a partir del software WinQSB**

## Anexo II. Resultados del modelo propuesto utilizando el software WinQSB

	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status
1	DR1a1(1)	0	22,0000	0	0	basic
2	DR2a1(1)	10,0000	24,0000	240,0000	0	basic
3	DR1a1(2)	0	16,0000	0	-8,0000	at bound
4	DR2a1(2)	0	21,0000	0	-3,0000	at bound
5	DR1a1(3)	0	24,0000	0	0	at bound
6	DR2a1(3)	0	21,0000	0	-3,0000	at bound
7	DR1a1(4)	0	24,0000	0	-2,0000	at bound
8	DR2a1(4)	0	24,0000	0	-2,1200	at bound
9	DR1a2(1)	0	27,0000	0	-2,0000	at bound
10	DR2a2(1)	8,0000	29,0000	232,0000	0	basic
11	DR1a2(2)	0	21,0000	0	-9,0000	at bound
12	DR2a2(2)	0	26,0000	0	-5,0000	at bound
13	DR1a2(3)	0	29,0000	0	-1,0000	at bound
14	DR2a2(3)	0	26,0000	0	-3,0000	at bound
15	DR1a2(4)	0	29,0000	0	-3,0000	at bound
16	DR2a2(4)	0	29,0000	0	-2,0000	at bound
17	DR1b1(1)	0	18,0000	0	-2,0000	at bound
18	DR2b1(1)	0	17,0000	0	-5,0000	at bound
19	DR1b1(2)	0	17,0000	0	-5,0000	at bound
20	DR2b1(2)	0	22,0000	0	0	basic
21	DR1b1(3)	14,0000	22,0000	308,0000	0	basic
22	DR2b1(3)	0	16,0000	0	-6,0000	at bound
23	DR1b1(4)	0	20,0000	0	-4,0000	at bound
24	DR2b1(4)	0	20,0000	0	-4,1200	at bound
25	DR1b2(1)	0	18,0000	0	-3,0000	at bound
26	DR2b2(1)	0	17,0000	0	-4,0000	at bound
27	DR1b2(2)	0	17,0000	0	-5,0000	at bound
28	DR2b2(2)	0	22,0000	0	-1,0000	at bound
29	DR1b2(3)	14,0000	22,0000	308,0000	0	basic
30	DR2b2(3)	0	16,0000	0	-5,0000	at bound
31	DR1b2(4)	0	20,0000	0	-4,0000	at bound
32	DR2b2(4)	0	20,0000	0	-3,0000	at bound
33	DR1c1(1)	0	14,0000	0	-3,0000	at bound
34	DR2c1(1)	7,0000	19,0000	133,0000	0	basic
35	DR1c1(2)	0	18,0000	0	-1,0000	at bound
36	DR2c1(2)	0	19,0000	0	0	at bound
37	DR1c1(3)	0	18,0000	0	-1,0000	at bound
38	DR2c1(3)	0	16,0000	0	-3,0000	at bound
39	DR1c1(4)	0	15,0000	0	-6,0000	at bound
40	DR2c1(4)	0	16,0000	0	-5,1200	at bound
41	DR1c2(1)	0	8,0000	0	-5,0000	at bound
42	DR2c2(1)	15,0000	13,0000	195,0000	0	basic
43	DR1c2(2)	0	12,0000	0	-2,0000	at bound
44	DR2c2(2)	0	13,0000	0	-2,0000	at bound
45	DR1c2(3)	0	12,0000	0	-2,0000	at bound
46	DR2c2(3)	0	10,0000	0	-3,0000	at bound
47	DR1c2(4)	0	9,0000	0	-7,0000	at bound
48	DR2c2(4)	0	10,0000	0	-5,0000	at bound
49	Surplus(s)11	34,0000	-1,0000	-34,0000	0	basic
50	Surplus(s)21	0	-3,0000	0	-2,0000	at bound
51	Surplus(s)31	21,0000	-2,0000	-42,0000	0	basic
52	Surplus(s)12	17,0000	-1,0000	-17,0000	0	basic
53	Surplus(s)22	5,0000	-3,0000	-15,0000	0	basic
54	Surplus(s)32	23,0000	-2,0000	-46,0000	0	basic
55	SR111(1)	0	-2,0000	0	-4,0000	at bound
56	SR121(1)	2,0000	-1,0000	-2,0000	0	basic
57	SR111(2)	0	-1,0000	0	-1,0000	at bound
58	SR121(2)	0	-1,0000	0	-2,0000	at bound
59	SR111(3)	14,0000	-2,0000	-28,0000	0	basic
60	SR121(3)	0	-3,0000	0	-4,0000	at bound
61	SR111(4)	0	-4,0000	0	0	basic
62	SR121(4)	0	-1,0000	0	-2,0000	at bound
63	SR211(1)	0	-1,0000	0	-1,0000	at bound
64	SR221(1)	15,0000	-3,0000	-45,0000	0	basic
65	SR211(2)	0	-2,0000	0	0	at bound
66	SR221(2)	0	-1,0000	0	0	basic
67	SR211(3)	0	-5,0000	0	-1,0000	at bound
68	SR221(3)	0	-1,0000	0	0	basic
69	SR211(4)	0	-6,0000	0	0	at bound
70	SR221(4)	0	-3,0000	0	-2,0000	at bound

71	SR311(1)	0	-4,000	0	-4,000	at bound
72	SR321(1)	0	-5,000	0	-2,000	at bound
73	SR311(2)	0	-2,000	0	0	at bound
74	SR321(2)	0	-3,000	0	-2,000	at bound
75	SR311(3)	0	-6,000	0	-2,000	at bound
76	SR321(3)	0	-7,000	0	-6,000	at bound
77	SR311(4)	0	-7,000	0	-1,000	at bound
78	SR321(4)	0	-1,000	0	0	basic
79	SR112(1)	0	-2,000	0	-3,000	at bound
80	SR122(1)	23,000	-1,000	-23,000	0	basic
81	SR112(2)	0	-1,000	0	-1,000	at bound
82	SR122(2)	0	-1,000	0	-4,000	at bound
83	SR112(3)	14,000	-2,000	-28,000	0	basic
84	SR122(3)	0	-3,000	0	-4,000	at bound
85	SR112(4)	0	-4,000	0	0	basic
86	SR122(4)	0	-1,000	0	-1,000	at bound
87	SR212(1)	0	-1,000	0	0	at bound
88	SR222(1)	0	-3,000	0	0	at bound
89	SR212(2)	0	-2,000	0	0	at bound
90	SR222(2)	0	-1,000	0	-2,000	at bound
91	SR212(3)	0	-5,000	0	-1,000	at bound
92	SR222(3)	0	-1,000	0	0	basic
93	SR212(4)	0	-6,000	0	0	at bound
94	SR222(4)	0	-3,000	0	-1,000	at bound
95	SR312(1)	0	-4,000	0	-4,000	at bound
96	SR322(1)	0	-5,000	0	-3,000	at bound
97	SR312(2)	0	-2,000	0	-1,000	at bound
98	SR322(2)	0	-3,000	0	-5,000	at bound
99	SR312(3)	0	-6,000	0	-3,000	at bound
100	SR322(3)	0	-7,000	0	-7,000	at bound
101	SR312(4)	0	-7,000	0	-2,000	at bound
102	SR322(4)	0	-1,000	0	0	basic
103	PR111	0	-2,000	0	0	basic
104	PR112	0	-3,000	0	0	basic
105	PR211	17,000	-2,000	-34,000	0	basic
106	PR212	23,000	-1,000	-23,000	0	basic
107	PR121	0	-3,000	0	0	basic
108	PR122	0	-5,000	0	-2,000	at bound
109	PR221	0	-3,000	0	0	basic
110	PR222	0	-7,000	0	0	basic
111	PR131	14,000	-1,000	-14,000	0	basic
112	PR132	14,000	-1,000	-14,000	0	basic
113	PR231	0	-4,000	0	0	basic
114	PR232	0	-3,000	0	0	basic
115	PR141	0	-1,000	0	0	basic
116	PR142	0	-2,000	0	-1,000	at bound
117	PR241	0	-6,000	0	0	basic
118	PR242	0	-4,000	0	0	basic
119	Surplus(sp)111	0	-2,000	0	0	basic
120	Surplus(pc)111	0	-2,000	0	0	at bound
121	Surplus(sp)112	0	-2,000	0	0	basic
122	Surplus(pc)112	0	-2,000	0	-3,000	at bound
123	Surplus(sp)211	0	-3,000	0	-2,000	at bound
124	Surplus(pc)211	0	-3,000	0	-3,000	at bound
125	Surplus(sp)212	0	-3,000	0	-3,000	at bound
126	Surplus(pc)212	0	-3,000	0	-4,000	at bound
127	Surplus(sp)121	0	-1,000	0	0	basic
128	Surplus(pc)121	0	-1,000	0	0	basic
129	Surplus(sp)122	0	-1,000	0	0	basic
130	Surplus(pc)122	0	-1,000	0	-3,000	at bound
131	Surplus(sp)221	0	-4,000	0	-5,000	at bound
132	Surplus(pc)221	0	-4,000	0	-2,000	at bound
133	Surplus(sp)222	0	-4,000	0	0	basic
134	Surplus(pc)222	0	-4,000	0	-7,000	at bound
135	Surplus(sp)131	0	-2,000	0	-1,000	at bound
136	Surplus(pc)131	0	-2,000	0	-1,000	at bound
137	Surplus(sp)132	0	-2,000	0	-3,000	at bound
138	Surplus(pc)132	0	-2,000	0	-4,000	at bound
139	Surplus(sp)231	0	-4,000	0	-3,000	at bound
140	Surplus(pc)231	0	-4,000	0	-4,000	at bound
141	Surplus(sp)232	0	-4,000	0	-2,000	at bound
142	Surplus(pc)232	0	-4,000	0	-5,000	at bound

143	Surplus(sp)141	0	-1,0000	0	0	at bound
144	Surplus(pc)141	0	-1,0000	0	0	basic
145	Surplus(sp)142	0	-1,0000	0	-4,0000	at bound
146	Surplus(pc)142	0	-1,0000	0	-5,0000	at bound
147	Surplus(sp)241	0	-1,0000	0	0	basic
148	Surplus(pc)241	0	-1,0000	0	-2,1200	at bound
149	Surplus(sp)242	0	-1,0000	0	0	basic
150	Surplus(pc)242	0	-1,0000	0	-4,0000	at bound
151	y11	0	-10,0000	0	0	basic
152	y12	0	-11,0000	0	-24,0000	at bound
153	y13	1,0000	-12,0000	-12,0000	67,0000	at bound
154	y14	0	-20,0000	0	-33,0000	at bound
155	y21	1,0000	-13,0000	-13,0000	29,0000	at bound
156	y22	0	-15,0000	0	0	basic
157	y23	0	-12,0000	0	-33,0000	at bound
158	y24	0	-17,0000	0	0	basic
159	Slac(c)a1	0	-4,0000	0	-27,0000	at bound
160	Slac(c)a2	0	-4,0000	0	-32,0000	at bound
161	Slac(c)b1	0	-10,0000	0	-31,0000	at bound
162	Slac(c)b2	0	-10,0000	0	-30,0000	at bound
163	Slac(c)c1	0	-1,0000	0	-19,0000	at bound
164	Slac(c)c2	0	-5,0000	0	-17,0000	at bound
	Objective	Function	(Max.) =	1.026,0000		

Fuente: Elaboración propia a partir del software WinQSB

Anexo III. Resultados del modelo propuesto con restricciones financieras utilizando el software WinQSB

	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status
1	DR1a1(1)	0	22,0000	0	-1,0870	at bound
2	DR2a1(1)	9,0000	24,0000	216,0000	0	basic
3	DR1a1(2)	0	16,0000	0	-10,0000	at bound
4	DR2a1(2)	0	21,0000	0	-3,0000	at bound
5	DR1a1(3)	1,0000	24,0000	24,0000	0	basic
6	DR2a1(3)	0	21,0000	0	0	basic
7	DR1a1(4)	0	24,0000	0	0	basic
8	DR2a1(4)	0	24,0000	0	-2,0000	at bound
9	DR1a2(1)	0	27,0000	0	-3,0869	at bound
10	DR2a2(1)	8,0000	29,0000	232,0000	0	basic
11	DR1a2(2)	0	21,0000	0	-11,0000	at bound
12	DR2a2(2)	0	26,0000	0	-5,0000	at bound
13	DR1a2(3)	0	29,0000	0	-1,0000	at bound
14	DR2a2(3)	0	26,0000	0	0	basic
15	DR1a2(4)	0	29,0000	0	0	basic
16	DR2a2(4)	0	29,0000	0	-2,0000	at bound
17	DR1b1(1)	0	18,0000	0	-3,0870	at bound
18	DR2b1(1)	0	17,0000	0	-5,0000	at bound
19	DR1b1(2)	0	17,0000	0	-7,0000	at bound
20	DR2b1(2)	0	22,0000	0	0	basic
21	DR1b1(3)	14,0000	22,0000	308,0000	0	basic
22	DR2b1(3)	0	16,0000	0	-3,0000	at bound

23	DR1b1(4)	0	20,0000	0	-2,0000	at bound
24	DR2b1(4)	0	20,0000	0	-4,0000	at bound
25	DR1b2(1)	0	18,0000	0	-4,0869	at bound
26	DR2b2(1)	0	17,0000	0	-4,0000	at bound
27	DR1b2(2)	0	17,0000	0	-7,0000	at bound
28	DR2b2(2)	0	22,0000	0	-1,0000	at bound
29	DR1b2(3)	14,0000	22,0000	308,0000	0	basic
30	DR2b2(3)	0	16,0000	0	-2,0000	at bound
31	DR1b2(4)	0	20,0000	0	-1,0000	at bound
32	DR2b2(4)	0	20,0000	0	-3,0000	at bound
33	DR1c1(1)	0	14,0000	0	-4,0870	at bound
34	DR2c1(1)	7,0000	19,0000	133,0000	0	basic
35	DR1c1(2)	0	18,0000	0	-3,0000	at bound
36	DR2c1(2)	0	19,0000	0	0	at bound
37	DR1c1(3)	0	18,0000	0	-1,0000	at bound
38	DR2c1(3)	0	16,0000	0	0	at bound
39	DR1c1(4)	0	15,0000	0	-4,0000	at bound
40	DR2c1(4)	0	16,0000	0	-5,0000	at bound
41	DR1c2(1)	0	8,0000	0	-6,0869	at bound
42	DR2c2(1)	15,0000	13,0000	195,0000	0	basic
43	DR1c2(2)	0	12,0000	0	-4,0000	at bound
44	DR2c2(2)	0	13,0000	0	-2,0000	at bound
45	DR1c2(3)	0	12,0000	0	-2,0000	at bound
46	DR2c2(3)	0	10,0000	0	0	at bound

47	DR1c2(4)	0	9,0000	0	-4,0000	at bound
48	DR2c2(4)	0	10,0000	0	-5,0000	at bound
49	Surplus(s)11	34,0000	-1,0000	-34,0000	0	basic
50	Surplus(s)21	0	-3,0000	0	-2,0000	at bound
51	Surplus(s)31	21,0000	-2,0000	-42,0000	0	basic
52	Surplus(s)12	17,0000	-1,0000	-17,0000	0	basic
53	Surplus(s)22	5,0000	-3,0000	-15,0000	0	basic
54	Surplus(s)32	23,0000	-2,0000	-46,0000	0	basic
55	SR111(1)	0	-2,0000	0	-3,0000	at bound
56	SR121(1)	1,0000	-1,0000	-1,0000	0	basic
57	SR111(2)	0	-1,0000	0	-1,0000	at bound
58	SR121(2)	0	-1,0000	0	-7,0000	at bound
59	SR111(3)	15,0000	-2,0000	-30,0000	0	basic
60	SR121(3)	0	-3,0000	0	-10,0000	at bound
61	SR111(4)	0	-4,0000	0	-4,0000	at bound
62	SR121(4)	0	-1,0000	0	-2,0000	at bound
63	SR211(1)	0	-1,0000	0	0	basic
64	SR221(1)	15,0000	-3,0000	-45,0000	0	basic
65	SR211(2)	0	-2,0000	0	0	basic
66	SR221(2)	0	-1,0000	0	-5,0000	at bound
67	SR211(3)	0	-5,0000	0	-1,0000	at bound
68	SR221(3)	0	-1,0000	0	-6,0000	at bound
69	SR211(4)	0	-6,0000	0	-4,0000	at bound
70	SR221(4)	0	-3,0000	0	-2,0000	at bound

71	SR311(1)	0	-4,0000	0	-3,0000	at bound
72	SR321(1)	0	-5,0000	0	-2,0000	at bound
73	SR311(2)	0	-2,0000	0	0	at bound
74	SR321(2)	0	-3,0000	0	-7,0000	at bound
75	SR311(3)	0	-6,0000	0	-2,0000	at bound
76	SR321(3)	0	-7,0000	0	-12,0000	at bound
77	SR311(4)	0	-7,0000	0	-5,0000	at bound
78	SR321(4)	0	-1,0000	0	0	basic
79	SR112(1)	0	-2,0000	0	-3,0000	at bound
80	SR122(1)	23,0000	-1,0000	-23,0000	0	basic
81	SR112(2)	0	-1,0000	0	-1,0000	at bound
82	SR122(2)	0	-1,0000	0	-4,0000	at bound
83	SR112(3)	14,0000	-2,0000	-28,0000	0	basic
84	SR122(3)	0	-3,0000	0	-7,0000	at bound
85	SR112(4)	0	-4,0000	0	-4,0000	at bound
86	SR122(4)	0	-1,0000	0	-1,0000	at bound
87	SR212(1)	0	-1,0000	0	0	at bound
88	SR222(1)	0	-3,0000	0	0	at bound
89	SR212(2)	0	-2,0000	0	0	at bound
90	SR222(2)	0	-1,0000	0	-2,0000	at bound
91	SR212(3)	0	-5,0000	0	-1,0000	at bound
92	SR222(3)	0	-1,0000	0	-3,0000	at bound
93	SR212(4)	0	-6,0000	0	-4,0000	at bound
94	SR222(4)	0	-3,0000	0	-1,0000	at bound
95	SR312(1)	0	-4,0000	0	-4,0000	at bound

96	SR322(1)	0	-5,0000	0	-3,0000	at bound
97	SR312(2)	0	-2,0000	0	-1,0000	at bound
98	SR322(2)	0	-3,0000	0	-5,0000	at bound
99	SR312(3)	0	-6,0000	0	-3,0000	at bound
100	SR322(3)	0	-7,0000	0	-10,0000	at bound
101	SR312(4)	0	-7,0000	0	-6,0000	at bound
102	SR322(4)	0	-1,0000	0	0	at bound
103	PR111	0	-2,0000	0	0	basic
104	PR112	0	-3,0000	0	0	basic
105	PR211	16,0000	-2,0000	-32,0000	0	basic
106	PR212	23,0000	-1,0000	-23,0000	0	basic
107	PR121	0	-3,0000	0	0	basic
108	PR122	0	-5,0000	0	0	basic
109	PR221	0	-3,0000	0	0	basic
110	PR222	0	-7,0000	0	0	basic
111	PR131	15,0000	-1,0000	-15,0000	0	basic
112	PR132	14,0000	-1,0000	-14,0000	0	basic
113	PR231	0	-4,0000	0	0	basic
114	PR232	0	-3,0000	0	0	basic
115	PR141	0	-1,0000	0	0	basic
116	PR142	0	-2,0000	0	0	basic
117	PR241	0	-6,0000	0	0	basic
118	PR242	0	-4,0000	0	0	basic
119	Surplus(sp)111	0	-2,0000	0	-1,0000	at bound

120	Surplus(pc)111	0	-2,0000	0	0	basic
121	Surplus(sp)112	0	-2,0000	0	0	basic
122	Surplus(pc)112	0	-2,0000	0	-4,0869	at bound
123	Surplus(sp)211	0	-3,0000	0	-2,0000	at bound
124	Surplus(pc)211	0	-3,0000	0	-3,0000	at bound
125	Surplus(sp)212	0	-3,0000	0	-3,0000	at bound
126	Surplus(pc)212	0	-3,0000	0	-4,0000	at bound
127	Surplus(sp)121	0	-1,0000	0	0	basic
128	Surplus(pc)121	0	-1,0000	0	0	basic
129	Surplus(sp)122	0	-1,0000	0	0	basic
130	Surplus(pc)122	0	-1,0000	0	-5,0000	at bound
131	Surplus(sp)221	0	-4,0000	0	0	basic
132	Surplus(pc)221	0	-4,0000	0	-2,0000	at bound
133	Surplus(sp)222	0	-4,0000	0	0	basic
134	Surplus(pc)222	0	-4,0000	0	-7,0000	at bound
135	Surplus(sp)131	0	-2,0000	0	-1,0000	at bound
136	Surplus(pc)131	0	-2,0000	0	-1,0000	at bound
137	Surplus(sp)132	0	-2,0000	0	-3,0000	at bound
138	Surplus(pc)132	0	-2,0000	0	-4,0000	at bound
139	Surplus(sp)231	0	-4,0000	0	0	basic
140	Surplus(pc)231	0	-4,0000	0	-4,0000	at bound
141	Surplus(sp)232	0	-4,0000	0	0	basic
142	Surplus(pc)232	0	-4,0000	0	-3,0000	at bound
143	Surplus(sp)141	0	-1,0000	0	0	basic
144	Surplus(pc)141	0	-1,0000	0	-1,0000	at bound

145	Surplus(sp)142	0	-1,0000	0	0	basic
146	Surplus(pc)142	0	-1,0000	0	-2,0000	at bound
147	Surplus(sp)241	0	-1,0000	0	0	basic
148	Surplus(pc)241	0	-1,0000	0	-2,0000	at bound
149	Surplus(sp)242	0	-1,0000	0	0	basic
150	Surplus(pc)242	0	-1,0000	0	-4,0000	at bound
151	y11	0	-10,0000	0	0	basic
152	y12	0	-11,0000	0	-11,0002	at bound
153	y13	1,0000	-12,0000	-12,0000	39,7140	at bound
154	y14	0	-20,0000	0	0	basic
155	y21	1,0000	-13,0000	-13,0000	-479,3716	at bound
156	y22	0	-15,0000	0	0	basic
157	y23	0	-12,0000	0	-80,0004	at bound
158	y24	0	-17,0000	0	-183,0002	at bound
159	Slac(c)a1	0	-4,0000	0	-27,0000	at bound
160	Slac(c)a2	0	-4,0000	0	-32,0000	at bound
161	Slac(c)b1	0	-10,0000	0	-31,0000	at bound
162	Slac(c)b2	0	-10,0000	0	-30,0000	at bound
163	Slac(c)c1	0	-1,0000	0	-19,0000	at bound
164	Slac(c)c2	0	-5,0000	0	-17,0000	at bound
165	WK(s)1	278,5000	0	0	0	basic
166	WK(s)2	19,7000	0	0	0	basic
167	WK(p)1	273,2500	0	0	0	basic
168	WK(p)2	46,5000	0	0	0	basic

	Objective	Function	(Max.) =	1.026,0000		
--	-----------	----------	----------	------------	--	--

Fuente: Elaboración propia a partir del software WinQSB