

# Modelos para la planificación centralizada de la producción y el transporte en la cadena de suministro: una revisión

## MODELS FOR CENTRALIZED PLANNING OF PRODUCTION AND TRANSPORT IN A SUPPLY CHAIN: A REVIEW.

This article presents a bibliographical review of mathematical programming models for centralized planning of production and transport in a supply-chain. The purpose of this review is to identify current and future research in this field and to propose a classification framework based on the following elements: structure of the supply chain, level of decision, focus of the modeling, purpose, information exchanged and practical application. The objective of the article is to provide a starting point for studying the problems of planning action and transport in a supply-chain aimed at researchers in the field of production management.

**KEY WORDS:** state-of-the-art, models, mathematical programming, production and transport planning, supply chain.

## MODÈLES POUR LA PLANIFICATION CENTRALISÉE DE LA PRODUCTION ET LE TRANSPORT EN CHAÎNE DE FOURNITURES : UNE RÉVISION.

Cet article propose une révision bibliographique sur les modèles de programmation mathématique pour la planification centralisée de la production et le transport en chaîne de fournitures. L'objectif de cette révision est l'identification des recherches actuelles et futures dans ce domaine et la proposition d'un cadre de classification basé sur les éléments suivants : structure de la chaîne de fournitures, niveau de décision, approche de modèle, objectif, échange d'informations et application pratique. L'article a pour objectif d'orienter l'étude des problèmes de planification de la production et du transport de la chaîne de fournitures, pour les chercheurs en gestion de production.

**MOTS-CLEFS :** État de l'art, modèles, programmation mathématique, planification de la production et du transport, chaîne de fourniture.

## MODELOS PARA O PLANEJAMENTO CENTRALIZADO DA PRODUÇÃO E O TRANSPORTE NA CADEIA DE SUPRIMENTO: UMA REVISÃO.

Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre os modelos de programação matemática para o planejamento centralizado da produção e o transporte em uma cadeia de suprimento. O propósito desta revisão é identificar a pesquisa atual e futura neste campo e propor um marco de classificação baseado nos seguintes elementos: estrutura da cadeia de suprimento, nível de decisão, enfoque de modelagem, propósito, informação intercambiada e aplicação prática. O objetivo do artigo é proporcionar um ponto de partida para o estudo dos problemas de planejamento da produção e o transporte da cadeia de suprimento orientado aos pesquisadores de gestão da produção.

**PALAVRAS CHAVE:** Estado da arte, modelos, programação matemática, planejamento da produção e o transporte, cadeia de suprimento.

---

CLASIFICACIÓN JEL: G1, L1.

RECIBIDO: septiembre 2008 APROBADO: febrero 2010

CORRESPONDENCIA: Escuela Politécnica Superior de Alcoy. Plaza Ferández i Carbonell n.º 2. Valencia, España.

CITACIÓN: Mula, J., Peidro, D., Diaz-Madroñero, M. & Hernández, J.E.(2010). Modelos para la planificación centralizada de la producción y el transporte en la cadena de suministro: una revisión. *Innovar*, 20(37), 179-194.

## Josefa Mula

Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP), Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Alcoy  
Correo electrónico: fmula@cigip.upv.es

## David Peidro

Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP), Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Alcoy  
Correo electrónico: dapeipa@cigip.upv.es

## Manuel Díaz-Madroñero

Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP), Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Alcoy  
Correo electrónico: fcodiama@cigip.upv.es

## Jorge E. Hernández

Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de Producción (CIGIP), Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Politécnica Superior de Alcoy  
Correo electrónico: jeh@cigip.upv.es

**RESUMEN:** Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre los modelos de programación matemática para la planificación centralizada de la producción y el transporte en una cadena de suministro. El propósito de esta revisión es identificar la investigación actual y futura en este campo y proponer un marco de clasificación basado en los elementos siguientes: estructura de la cadena de suministro, nivel de decisión, enfoque de modelado, propósito, información intercambiada y aplicación práctica. El objetivo del artículo es proporcionar un punto de partida para el estudio de los problemas de planificación de la producción y el transporte de la cadena de suministro orientado a los investigadores de gestión de la producción.

**PALABRAS CLAVE:** estado del arte, modelos, programación matemática, planificación de la producción y el transporte, cadena de suministro.

## INTRODUCCIÓN

Una cadena de suministro (CS), según Beamon (1998), puede considerarse como un proceso integrado en el que un conjunto de varias organizaciones, tales como proveedores, fabricantes, distribuidores y minoristas, trabajan conjuntamente en la adquisición de materias primas, en la conversión de estas en productos finales y en la distribución de estos últimos a los minoristas. El número de nodos, el número de etapas y la estructura del flujo de materiales y de información contribuye a determinar la complejidad de la CS (Beamon y Chen, 2001). Los modelos de planificación del funcionamiento de una CS pueden clasificarse en tres grupos (Gupta y Maranas, 2007), 179-194.

2003): estratégicos, tácticos y operativos. Los modelos estratégicos trabajan con horizontes de cinco a diez años, y afectan al rendimiento a largo plazo del sistema desde una perspectiva de planificación y diseño de una CS. Los modelos operativos trabajan con intervalos de tiempo muy pequeños, de una a dos semanas, y contemplan los aspectos de secuenciación de operaciones y temporización de las tareas productivas. Por último, los modelos tácticos se sitúan en medio de los anteriores. Estos modelos trabajan con horizontes de planificación de uno a dos años, e incorporan algunas características tanto de los modelos operativos como de los estratégicos.

Según Perea-López *et al.* (2003), los responsables de planificación de una CS pueden adoptar un enfoque descentralizado o centralizado. En el primero de ellos, las decisiones se toman de forma independiente en cada uno de los nodos de la CS, mientras que en el segundo existe un gestor global que coordina las decisiones a lo largo de toda la CS.

La consideración simultánea de los problemas de planificación de la producción y el transporte en un entorno de CS supone un gran avance en la eficiencia de ambos procesos. La literatura en este campo es vasta, por lo que se presenta una revisión representativa de la investigación existente en el tema, en un intento por entender los métodos de modelado matemáticos usados para la planificación de la producción y el transporte en una CS, y con el fin de proporcionar una base para la investigación futura. Dada la globalización de las operaciones, se requieren nuevos modelos y herramientas para mejorar la previsión, el aprovisionamiento y la planificación de la producción a lo largo de las cadenas de suministro. Además, en el contexto de CS, las empresas industriales necesitan integrar la planificación de la producción y el transporte para optimizar ambos procesos conjuntamente.

En general, se han seleccionado trabajos basados principalmente en los criterios siguientes: a) modelos de programación matemáticos, y b) modelos para la planificación centralizada. Esta revisión no incluye aquellos trabajos que se centran en los niveles de decisión operativos, tales como el dimensionado del tamaño del lote y la secuenciación de la producción. Sin embargo, se han considerado los trabajos que presentan modelos para la planificación de la producción que conciben el transporte como un recurso para distribuir entre los productos, y se centran en los niveles tácticos u operativos y sus posibles combinaciones con los aspectos estratégicos.

Se describe cada aportación brevemente, pero no se describen o formulan detalladamente los modelos que han sido considerados. Este trabajo no pretende identificar

todos los trabajos bibliográficos ni extender una revisión de ellos, sino proporcionar un punto de partida al lector para investigar la literatura sobre los mejores métodos de gestión para los diferentes problemas de planificación de la producción y el transporte en el contexto de CS. Los objetivos del presente trabajo son: 1) la revisión de la literatura existente; 2) la clasificación de la literatura según la estructura de la CS, el nivel de decisión, el enfoque de modelado, el propósito, la información intercambiada y la aplicación práctica, y 3) la identificación de líneas futuras de investigación. Este trabajo puede servir como una visión global del estado del arte de los modelos de programación matemática para la planificación de la producción y el transporte para los nuevos investigadores de planificación de la CS. Además, puede ayudar a los planificadores para abordar este tipo de problemas en las cadenas de suministro del mundo real.

El resto del artículo se ha organizado de la siguiente forma. En el apartado siguiente se presenta la metodología de revisión. En el apartado 2 se incluye una taxonomía de los artículos revisados. Finalmente, el último apartado proporciona las conclusiones y las líneas futuras de investigación.

## METODOLOGÍA DE REVISIÓN

Este trabajo tiene por objeto la revisión del estado actual de los modelos de programación matemática para la planificación centralizada de la producción y el transporte en un entorno de CS. El proceso de búsqueda se ha realizado en bases de datos científico-técnicas que abarcan portales de editoriales tales como Elsevier, Taylor & Francis, Wiley, Blackwell o Emerald, con los siguientes criterios de búsqueda: supply chain linear programming models, supply chain production and transport planning, supply chain centralized planning models, production distribution planning supply chain, nonlinear programming production distribution planning, multiobjective programming production distribution planning. Además, y en gran medida, las mismas referencias bibliográficas de los artículos estudiados han sido un continuo referente de búsqueda. A la conclusión de este periodo se dispone de una colección inicial de 140 referencias en un tiempo de estudio de 25 años.

Este grupo inicial de referencias bibliográficas se sometió a un análisis en línea con el objetivo del presente trabajo. De este modo, se pueden distinguir dos grupos diferenciados. Por un lado, artículos con objetivos similares al de este documento, en el que se revisan los diferentes modelos de planificación en la CS, con variedad de criterios y, por otro lado, artículos que proponen diferentes tipos de modelos de programación matemática para la planificación de la producción y el transporte en la CS. Con

respecto al primer grupo de artículos, cabe destacar los trabajos de Vidal y Goetschalckx (1997), Beamon (1998), Erenguc *et al.* (1999), Schmidt y Wilhelm (2000), Bilgen y Ozkarahan (2004), Shah (2005), Stadtler (2005) y Dullaert *et al.* (2007). Algunos autores del segundo grupo son Chen y Wang (1997), McDonald y Karimi (1997), Lee y Kim (2002), Gupta y Maranas (2003), Lababidi *et al.* (2004), Chen y Lee (2004) y Liang y Cheng (2008).

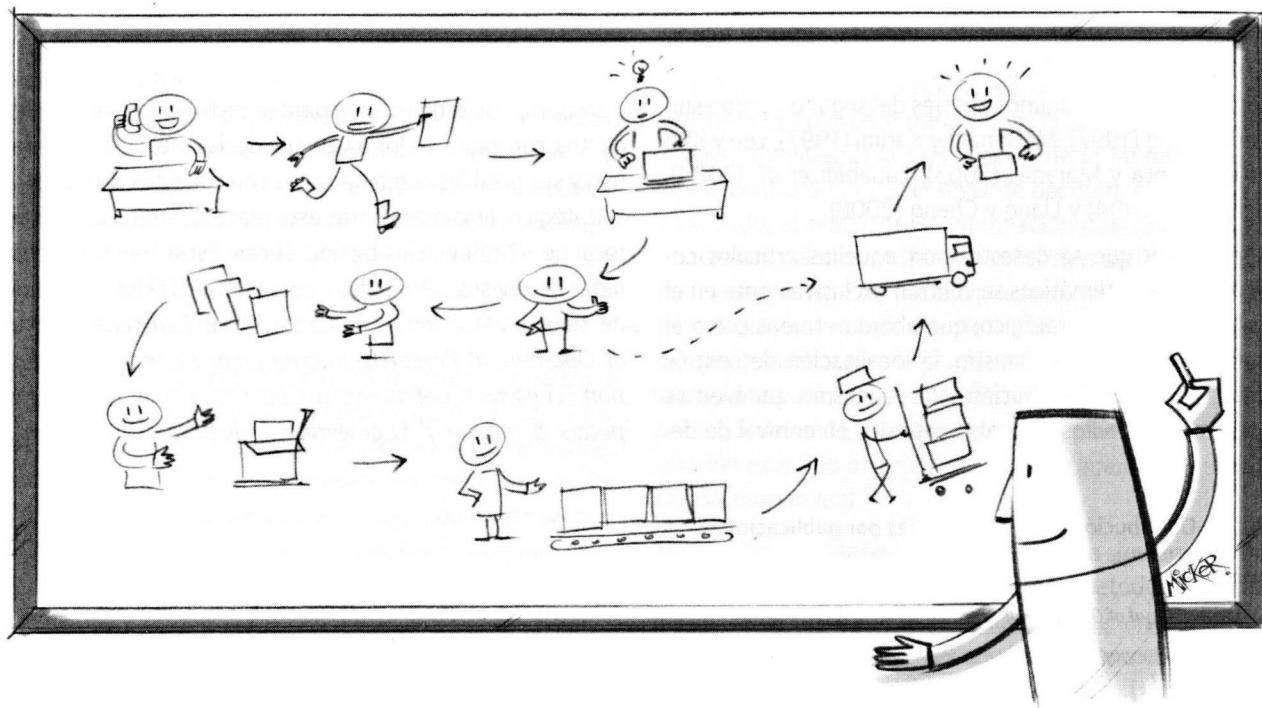
Cabe señalar que se desestimaron aquellos artículos cuyos modelos matemáticos se centran exclusivamente en el nivel de decisión estratégico, que abordan tareas como el diseño de la red de suministro, la localización de centros productivos o de distribución, etc. Asimismo, también se descartaron aquellos trabajos centrados en el nivel de de-

cisión operativo, tratando temas como el dimensionado de lote o la secuenciación de la producción. Por tanto, se han considerado aquellos trabajos en los que se presentan modelos para la planificación de la producción, tomando el transporte como un recurso para la distribución de los productos, centrados en los niveles de decisión táctico u operativo y sus posibles combinaciones con aspectos de carácter estratégico. Finalmente, tras este proceso, se seleccionó un total de 52 referencias bibliográficas. Estas han sido obtenidas de revistas (94,23%) y congresos (7,69%). Un grupo de siete publicaciones, compuesto por *European Journal of Operational Research*, *International Journal of Production Economics*, *Computers & Chemical Engineering*, *Computers & Industrial Engineering*, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *IIE Transactions* y *Computers & Operations Research*.

**TABLA 1. Distribución de las referencias por publicaciones**

Fuente	Referencias	% total
<i>European Journal of Operational Research</i>	6	11,54
<i>International Journal of Production Economics</i>	5	9,62
<i>Computers &amp; Chemical Engineering</i>	5	9,62
<i>Computers &amp; Industrial Engineering</i>	4	7,69
<i>Industrial &amp; Engineering Chemistry Research</i>	3	5,77
<i>IIE Transactions</i>	3	5,77
<i>Computers &amp; Operations Research</i>	3	5,77
<i>Omega-International Journal of Management Science</i>	2	3,85
<i>International Journal of Production Research</i>	2	3,85
<i>Fuzzy Sets and Systems</i>	2	3,85
<i>Transportation Science</i>	1	1,92
<i>Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review</i>	1	1,92
<i>Transportation Planning and Technology</i>	1	1,92
<i>Services Systems and Services Management. Proceedings of ICSSSM '05. 2005 International Conference</i>	1	1,92
<i>Production Planning &amp; Control</i>	1	1,92
<i>Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences</i>	1	1,92
<i>Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference</i>	1	1,92
<i>Or Spectrum</i>	1	1,92
<i>Journal of the Operational Research Society</i>	1	1,92
<i>International Journal of Operations &amp; Production Management</i>	1	1,92
<i>International Journal of Advanced Manufacturing Technology</i>	1	1,92
<i>Interfaces</i>	1	1,92
<i>Information Sciences</i>	1	1,92
<i>Expert Systems with Applications</i>	1	1,92
<i>Applied Mathematics and Computation</i>	1	1,92
<i>Annual meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society 2006</i>	1	1,92
<i>Aiche Journal</i>	1	1,92
<b>TOTAL</b>	<b>52</b>	<b>100,00</b>

Fuente: elaboración propia.



*Chemistry Research, IIE Transactions y Computers & Operations Research* concentran el 55,77% de las referencias utilizadas en el presente trabajo (tabla 1).

## CLASIFICACIÓN

Huang *et al.* (2003), quienes estudian el intercambio de la información de producción en la CS, plantean, entre otros, cuatro criterios de clasificación: estructura, nivel de decisión, enfoque de modelado e información intercambiada. En este artículo se ha extendido la clasificación de Huang *et al.* (2003) añadiendo dos nuevos criterios: propósito y aplicación práctica. Así, los seis criterios de clasificación considerados se describen a continuación:

**Estructura de la CS:** Define la disposición de las diversas organizaciones en la CS y cómo se relacionan entre sí.

**Nivel de decisión:** pueden diferenciarse tres niveles de decisión en una CS, estratégico, táctico y operativo, en función del periodo de influencia de la decisión por tomar. El nivel estratégico corresponde a decisiones propias de un horizonte a largo plazo; el nivel táctico corresponde a decisiones con un periodo de influencia medio, y el nivel operativo, a decisiones a muy corto plazo, generalmente diario.

**Enfoque de modelado:** consiste en el tipo de representación, en este caso matemática, de las relaciones y los aspectos por considerar en la CS.

**Propósito:** se trata del objetivo definido en el modelo matemático. Puede corresponder con un único propósito o puede considerar varios criterios optimizadores o de mejora simultáneamente.

**Información intercambiada:** consiste en la información intercambiada entre cada uno de los nodos de la red, determinados por el modelo, y que posibilitan la planificación de la producción y el transporte, según el propósito formulado (Huang *et al.*, 2003).

**Aplicación práctica:** presenta la aplicación que cada modelo considera para efectos de validación del modelo. El reflejo de las referencias de estudio al respecto de los anteriores criterios y su posterior clasificación se describen en los siguientes apartados.

### **Estructura de la cadena de suministro**

Beamon y Chen (2001) clasifican las diversas tipologías de estructuras de cadenas de suministro en cuatro tipos principales:

**Convergente:** son aquellas en las que cada nodo de la CS tiene al menos un sucesor y varios predecesores. En este tipo de cadenas de suministro, los componentes procedentes de los proveedores son ensamblados en los centros de producción, como por ejemplo en la industria aeronáutica.

Divergente: una CS puede ser clasificada como divergente si cada nodo tiene, al menos, un predecesor y varios sucesores. En este caso, una misma entidad distribuye sus productos a varias organizaciones en su CS.

Mixta: se trata de cadenas de suministro cuya estructura es una combinación de una CS convergente y una divergente.

Red: conformada por aquellas que no pueden clasificarse como convergentes, divergentes o mixtas, presentando una mayor complejidad que los tipos anteriores.

La clasificación de las referencias según la estructura de la CS se muestra en la tabla 2. La mayoría de las referencias contemplan en sus modelos matemáticos cadenas de suministro con una topología en red que combina la presencia de centros de fabricación y distribución principalmente, añadiendo en algunos casos la presencia de proveedores o minoristas como eslabones de la CS. Tan sólo siete referencias contemplan la presencia de un único centro de fabricación, dando lugar a estructuras de carácter divergente (Barbarosoğlu y Özgür, 1999; Tang *et al.*, 2005; Rizk *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2007 y Rizk *et al.*, 2008) o de carácter mixto (Demirli y Yimer, 2006 y Torabi y Hassini, 2008). Por otro lado, la estructura convergente no se contempla en ninguna de las referencias. En la tabla 2 también se presenta la clasificación de las referencias estudiadas en función del nivel de decisión.

### Nivel de decisión

Los niveles de decisión se definen en función del impacto en el tiempo generado en el proceso de planificación o de toma de decisiones. Según Huang *et al.* (2003), es posible distinguir en el nivel estratégico la selección de lugares de producción, almacenaje y distribución, así como la consideración de subcontratar parte de la producción para minimizar el coste global. En el nivel táctico pueden identificarse aspectos tales como la planificación de la producción y la distribución, la asignación de capacidades de producción y transporte e inventarios y la gestión de stocks de seguridad. En el nivel operativo, pueden distinguirse las operaciones de reabastecimiento y envíos. Así pues, los niveles de decisión se diferenciarán principalmente por el alcance y la influencia durante el tiempo de la decisión por tomar.

La totalidad de las referencias de estudio presentan aspectos relativos al nivel de decisión táctico, a excepción de siete de ellas (Sabri y Beamon, 2000; Timpe y Kallrath, 2000; Kallrath, 2002; Tang *et al.*, 2005; Rizk *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2007, Rizk *et al.*, 2008 y You y Grossmann, 2009). De este último grupo, tan sólo Tang *et al.* (2005), Rizk *et al.* (2006), Tang *et al.* (2007) y Rizk *et al.* (2008) se centran

exclusivamente en el nivel de decisión operativo, mientras que las referencias restantes combinan la presencia de aspectos de carácter estratégico y operativo. Por otro lado, puede identificarse otro conjunto de cinco referencias (Dogan y Goetschalckx, 1999; Jayaraman y Pirkul, 2001; Goetschalckx *et al.*, 2002; Jang *et al.*, 2002 y Das y Sengupta, 2009), que presentan simultáneamente aspectos relativos a los niveles de decisión estratégico y táctico. El resto de referencias de estudio contemplan únicamente cuestiones de carácter táctico.

### Enfoque de modelado

El modelado de la CS considerado en este estudio consiste en la formalización matemática de las relaciones entre los diferentes nodos de una CS, lo cual permite realizar la planificación de la producción y el transporte en esta mediante la consecución de un objetivo concreto, tal como la minimización de costes o la maximización del beneficio, entre otros objetivos, a partir de técnicas matemáticas como la probabilidad o el cálculo.

Una de las técnicas analíticas para el modelado de la planificación de la producción y el transporte dentro de la CS es la programación matemática de carácter determinista. Se trata de una técnica de optimización, cuya modalidad más extendida es la programación lineal y programación lineal entera y mixta, como puede comprobarse en los ejemplos expuestos en Vidal y Goetschalckx (1997).

Sin embargo, la existencia frecuente de varios objetivos simultáneos, la no linealidad de costes por volumen en las economías de escala y el carácter incierto de los problemas reales han deparado la aplicación de otro tipo de técnicas de modelado, tales como la programación no lineal, la programación no lineal entera, la programación multiobjetivo con restricciones no lineales, la programación matemática fuzzy y la programación estocástica, así como el uso de modelos híbridos lineales, estos últimos apoyados, en su gran mayoría, por métodos de simulación.

Asimismo, la dificultad para la resolución de los modelos de optimización ha supuesto el desarrollo de técnicas heurísticas, metaheurísticas, algoritmos genéticos, computación evolutiva, así como la relajación lagrangiana para la generación de soluciones próximas a la óptima con un coste computacional significativamente menor.

Gran parte de las referencias de estudio optan por un enfoque de modelado basado en la programación lineal, especialmente la programación lineal entera. Por contra, la programación no lineal tan sólo es empleada en cinco referencias (Benjamin, 1989; Lababidi *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2005; Tang *et al.*, 2007 y You y Grossmann, 2009). El

enfoque de modelado basado en la programación multiobjetivo aparece en seis referencias, de las cuales tres hacen uso de la programación lineal multiobjetivo o lineal entera multiobjetivo, y las tres restantes optan por el modelado no lineal. La incorporación de incertidumbre en los diferentes modelos se logra mediante la aplicación de la programación fuzzy y la programación estocástica. Ambos tipos de programación matemática pueden aparecer como enfoque de modelado complementario o como enfoque principal, como en el caso de Sakawa *et al.* (2001), Demirli y Yimer (2006), Aliev *et al.* (2007), Liang (2008) y Peidro *et al.* (2009) para la programación fuzzy, o los casos de Sabri y Beamon (2000) y Goetschalckx *et al.* (2002), para la programación estocástica. Igualmente, los algoritmos de resolución heurísticos y metaheurísticos aparecen como técnicas complementarias para la resolución de modelos de programación matemática, principalmente programación lineal entera, y en menor medida programación no lineal, programación multiobjetivo o programación fuzzy. El uso de herramientas de simulación complementarias a modelos matemáticos se manifiesta en el enfoque de modelado híbrido presente en cuatro referencias (Lee y Kim, 2000; Lee y Kim, 2002; Lee *et al.*, 2002 y Lim *et al.*, 2006). A continuación, se presentan cronológicamente ordenados cada uno de los enfoques de modelado utilizado por los diferentes trabajos revisados.

### Programación lineal

Martin *et al.* (1993) presentan un modelo de programación lineal para la planificación de la producción, distribución y operaciones de inventario en la industria del sector del vidrio.

Chen y Wang (1997) proponen un modelo de programación lineal para resolver la planificación integrada del aprovisionamiento, producción y distribución en una CS del sector del acero.

En Ryu *et al.* (2004) se plantea un enfoque de modelado binivel, compuesto por dos modelos de programación lineal, uno para la planificación de la producción y otro para la planificación de la distribución. Estos modelos consideran posteriormente la incertidumbre de demanda, recursos y capacidades, al ser reformulados mediante programación lineal multiparamétrica.

Por otro lado, Kanyalkar y Adil (2005) presentan un modelo de programación lineal para la planificación agregada y detallada de la producción y la distribución dinámica en una CS multiproducto y multiplanta.

Oh y Karimi (2006) proponen un modelo de programación lineal que integra la planificación de la producción

y distribución para una multinacional del sector químico en un entorno multiplanta, multiperiodo y multiproducto. Este modelo considera, además, datos de carácter fiscal y financiero, tales como los impuestos asociados a la actividad o las amortizaciones.

Por último, Jung *et al.* (2008) comparan modelos de programación lineal para entornos de planificación de la producción y el transporte centralizada y descentralizada.

### Programación lineal entera/entera mixta

McDonald y Karimi (1997) presentan un modelo de programación lineal entera mixta determinista para la resolución de un problema de planificación de la producción y el transporte en la industria química en un entorno multiplanta, multiproducto y multiperiodo.

Barbarosoğlu y Özgür (1999) desarrollan un modelo de programación lineal entera mixta cuya resolución se lleva a cabo a través de técnicas de relajación lagrangianas y heurísticas, convirtiéndose en un modelo descentralizado de dos etapas, una para la planificación de la producción y otra para el transporte.

Por otra parte, en Dogan y Goetschalckx (1999) se muestra un modelo de programación lineal entera mixta para el diseño de la CS y la planificación de la producción y la distribución. Goetschalckx *et al.* (2002) presentan dos modelos de programación lineal entera mixta, uno para la fase del diseño de una CS y otro para la planificación de la producción, el inventario y el transporte de una CS nacional con demanda estacional.

Timpe y Kallrath (2000) y Kallrath (2002) presentan un modelo de programación lineal entera mixta para la planificación de la producción, la distribución y las ventas, con escalas de tiempo diferenciadas para aspectos comerciales y de producción.

Dhaenens-Flipo y Finke (2001) desarrollan un modelo de planificación basado en programación lineal entera mixta en un entorno multiempresa, multiproducto y multiperiodo.

Jayaraman y Pirkul (2001) presentan un modelo integrado para el diseño y la planificación en una CS mediante programación lineal entera mixta.

Sakawa *et al.* (2001) elaboran un modelo de programación lineal entera mixta para la planificación de la producción y el transporte aplicado a una fábrica japonesa de elementos de construcción.

Por otra parte, Bredström y Rönnqvist (2002) plantean dos modelos independientes de programación lineal entera

mixta, uno para la planificación de la producción, considerando costes de transporte, y otro para la planificación de la distribución, en un entorno multiperiodo y multiproducto.

En Jang *et al.* (2002) se propone un sistema para la gestión de una CS basado en cuatro módulos: diseño de la CS, planificación de la producción y distribución, módulo de gestión del modelo y módulo de gestión de datos. Los modelos para el diseño de la CS y la planificación de la producción –con varios niveles de proveedores relacionados por la lista de materiales– y el transporte se formulan mediante programación lineal entera mixta.

Por otro lado, Jolayemi y Olorunniwo (2004) proponen un modelo determinista para la planificación de la producción y el transporte en un entorno multifábrica y multidistribuidor basado en la programación lineal entera mixta, para el cual se propone un procedimiento de reducción de su tamaño para facilitar su aplicación. Este modelo se complementa con el uso de un modelo de control predictivo.

Perea-López *et al.* (2003) desarrollan un modelo de programación lineal entera mixta multiperiodo para la caracterización dinámica de una CS.

Gen y Syarif (2005) presentan un modelo de programación lineal entera mixta para la planificación de la producción y el transporte.

Park (2005) propone un modelo integrado de planificación de la producción y el transporte mediante programación lineal entera mixta en un entorno multifábrica, multimotorista, multiproducto y multiperiodo. Asimismo, también presenta un submodelo de planificación de la producción, en el que las salidas actúan como entradas en otro submodelo cuya finalidad es la planificación del transporte, con el objetivo global de maximizar el beneficio global mediante la misma técnica.

Ekşioğlu *et al.* (2006) muestran un modelo integrado de planificación de la producción y el transporte en un entorno multiperiodo, multifábrica, monoproducto como una red de flujo o grafo a la que se asocia una formulación mediante programación lineal entera mixta. Posteriormente, Ekşioğlu *et al.* (2007) extienden este modelo a multiproducto, y lo resuelven a través de descomposición lagrangiana.

En Rizk *et al.* (2006) se propone un modelo de programación lineal entera mixta para el proceso de producción, así como tres diferentes formulaciones de funciones lineales a trozos que son utilizadas para desarrollar tres modelos equivalentes de programación lineal entera mixta para el proceso de distribución en el que se consideran economías de escala.

Bilgen y Ozkarahan (2007) plantean un modelo integrado de planificación de mezclas, cargas y transporte entre diferentes puertos marítimos aplicado a la industria de cereales mediante programación lineal entera mixta en un entorno multiperiodo.

Meijboom y Obel (2007) desarrollan un modelo de programación lineal entera mixta para la planificación de la producción a medio plazo. Además, los autores estudian la coordinación entre las diferentes etapas de una CS.

Por otra parte, Pibernik y Sucky (2007) proponen un modelo para la planificación maestra parcialmente centralizada en una CS mediante un enfoque de modelado basado en la programación lineal entera mixta.

Ouhimmou *et al.* (2008) presentan un modelo de optimización de la planificación táctica de una CS de la industria maderera mediante programación lineal entera mixta.

Rizk *et al.* (2008) proponen un modelo de programación lineal entera mixta para la planificación de la producción y la distribución en un entorno de fabricación con una única planta de producción y varios centros de distribución.

Por último, Das y Sengupta (2009) presentan un modelo de programación lineal entera mixta para la planificación de la producción y la distribución en una CS de carácter global afectada por diferentes regulaciones gubernamentales.

### Programación no lineal

Benjamin (1989) propone un modelo de programación no lineal que se resuelve mediante el algoritmo del gradiente complementado con un algoritmo heurístico.

Lababidi *et al.* (2004) desarrollan un modelo de programación no lineal entera mixta determinista y un modelo de programación estocástica de dos etapas con la incorporación de incertidumbre, aplicando tres escenarios diferentes.

Tang *et al.* (2005) presentan un modelo de programación no lineal entera mixta para la planificación sincronizada de la producción y el transporte que es resuelto mediante relajación lagrangiana. Posteriormente, en Tang *et al.* (2007) este modelo es aplicado a una CS de un fabricante de electrodomésticos chino.

You y Grossmann (2008) proponen un modelo de programación no lineal entera mixta para la optimización del diseño y la planificación de una CS con incertidumbre en la demanda.

## Programación multiobjetivo

Chen *et al.* (2003) presentan un modelo formulado mediante programación no lineal entera mixta multiobjetivo para un entorno multiproducto, multiperiodo y multiplanta que puede hacer uso de economías de escala. Por otro lado, Chen y Lee (2004) proponen un modelo de programación no lineal entera mixta multiobjetivo que considera la incertidumbre, modelada mediante escenarios en la demanda y los precios, para la planificación de la producción, el transporte, las ventas y los inventarios.

Chern y Hsieh (2007) proponen un modelo de programación lineal multiobjetivo para la planificación maestra de la producción.

Selim *et al.* (2008) proponen un modelo de programación lineal multiobjetivo para la planificación de la producción y distribución colaborativa.

Torabi y Hassini (2008) presentan un modelo de programación lineal multiobjetivo posibilista para la planificación maestra de la producción de la CS. Para su resolución, el modelo se transforma en un modelo de programación lineal multiobjetivo al que se le aplica un algoritmo *fuzzy*.

## Programación matemática *fuzzy*

Sakawa *et al.* (2001) incorporan la incertidumbre en algunos de los parámetros de su modelo mediante el uso de la programación matemática *fuzzy*.

Demirli y Yimer (2006) presentan un modelo de programación entera mixta *fuzzy* para la planificación integrada de la producción y la distribución en una CS de fabricación bajo pedido.

Asimismo, Aliev *et al.* (2007) desarrollan un modelo de programación lineal *fuzzy* integrado para la planificación de la producción y la distribución multiproducto y multiperíodo. La función objetivo del modelo, así como las variables de decisión, se consideran *fuzzy*.

Liang (2008) y Liang y Cheng (2008) proponen un modelo de programación lineal multiobjetivo *fuzzy* considerando la incertidumbre en la demanda y la capacidad para un fabricante de elementos mecánicos en un entorno multiperíodo y multiproducto.

Por otro lado, Selim *et al.* (2008) adoptan un enfoque *fuzzy* de programación por objetivos para incorporar la incertidumbre a su modelo multiobjetivo.

Pedro *et al.* (2009) desarrollan un modelo de programación lineal entera mixta *fuzzy* para la planificación de una CS considerando la incertidumbre asociada al aprovisionamiento, la demanda y los procesos. Este modelo se valida

con datos procedentes de una CS real perteneciente al sector automotor.

## Programación estocástica

Sabri y Beamon (2000) presentan un modelo estocástico multiobjetivo para la planificación estratégica y operativa de la CS. Las salidas del submodelo estratégico actúan como entradas del submodelo operativo, que incorpora la incertidumbre de la demanda, de la producción y de la distribución, y cuyos resultados realimentan de nuevo el submodelo estratégico en un proceso iterativo.

Gupta y Maranas (2003) adoptan como base de su trabajo el modelo de McDonald y Karimi (1997), y proponen su transformación en un modelo estocástico que contempla la incertidumbre de la demanda.

Asimismo, Lababidi *et al.* (2004) introducen la incertidumbre mediante un modelo de programación estocástica de dos etapas.

Roghani *et al.* (2007) presentan un enfoque de modelado de programación lineal multiobjetivo estocástico de dos niveles, uno para la planificación de la producción y otro para la planificación de la distribución. Para la resolución, se transforma el modelo estocástico de dos niveles en un modelo determinista equivalente de programación no lineal multiobjetivo al que se aplican técnicas *fuzzy* para resolverlo

## Algoritmos heurísticos y metaheurísticos

Los modelos propuestos en Goetschalckx *et al.* (2002) se resuelven mediante técnicas heurísticas. Asimismo, se aplican técnicas de relajación lagrangiana y un procedimiento de resolución heurístico al modelo integrado propuesto por Jarayaman y Pirkul (2001).

Los modelos relativos al diseño y la planificación de la producción propuestos por Jang *et al.* (2002) se resuelven mediante técnicas de relajación lagrangiana y algoritmos genéticos.

Asimismo, el modelo propuesto por Gen y Syarif (2005) para la planificación de la producción y el transporte se resuelve mediante algoritmos genéticos y técnicas *fuzzy*.

Park (2005) presenta también un modelo heurístico en dos fases. En la primera fase se establece un plan de producción y distribución previo, que es mejorado en la segunda fase mediante la modificación de parámetros de transporte.

Ekşioğlu *et al.* (2006) reformulan su modelo de planificación mediante técnicas de relajación y para la resolución utilizan un algoritmo heurístico primal-dual.

El modelo *fuzzy* propuesto por Aliev *et al.* (2007) se resuelve mediante un algoritmo genético, al igual que el modelo de planificación maestra propuesto por Chern y Hsieh (2007).

Ouhimmou *et al.* (2008) presentan una heurística basada en la descomposición temporal para la resolución de su modelo de planificación táctica.

Por último, You y Grossmann (2008) también aplican técnicas heurísticas para la resolución de su modelo no lineal con incertidumbre en la demanda.

### Modelos híbridos

Lee y Kim (2000), Lee y Kim (2002) y Lee *et al.* (2002) proponen un modelo híbrido que combina la programación lineal y la simulación ajustando la capacidad total del sistema en un entorno multiproducto, multiperiodo y multiplanta.

Lim *et al.* (2006) presentan un modelo híbrido formado por un modelo de programación lineal entera mixta para decidir las capacidades de producción y almacenamiento de cada uno de los eslabones de una CS y un modelo de simulación discreta de eventos para ejecutar la planificación de la producción y la distribución.

### Propósito

Este criterio de clasificación tiene como objetivo agrupar el propósito general del modelo propuesto. Además, un componente importante en el análisis de una CS es el establecimiento de medidas de mejora que serán utilizadas para determinar la eficiencia y efectividad y poder compararlas con otras alternativas competitivas (Beamon, 1998). En el presente caso, se considerarán aspectos de carácter cuantitativo basados en costes y en atención al cliente. Según Beamon (1998), entre los aspectos relacionados con los costes se encuentran la minimización de costes, la maximización de ventas, la maximización del beneficio, la minimización de inversiones en inventario y la maximización del retorno de la inversión, entre otros. Entre los propósitos relacionados con el cliente pueden encontrarse la maximización o cumplimiento del nivel de servicio, la flexibilidad en volumen o en plazo de entrega y la minimización de entregas retrasadas. En la tabla 2 se muestra la clasificación de las referencias estudiadas en función del propósito en cada una de ellas.

La totalidad de las referencias de estudio presentan propósitos relacionados con la optimización de costes. Gran parte de estas referencias establecen como objetivo de su modelo matemático la minimización de los costes totales

y, en menor medida, la maximización del beneficio obtenido o la maximización del nivel de ventas. El uso de enfoques de modelado multiobjetivo posibilita la adopción de varios propósitos de forma simultánea. Así pues, pueden encontrarse referencias como Selim *et al.* (2008) en las que se contempla la minimización de costes y la maximización del beneficio, o como en el caso de Kallrath (2002) en el que se fija como propósito, además de los anteriores, la maximización del nivel de ventas. Sin embargo, en ocasiones se opta por complementar las mejoras de carácter económico con la mejora del servicio prestado al cliente. Así pues, ocho de las referencias estudiadas fijan como objetivo aspectos relacionados con el cliente. En concreto, cinco de ellas (Chen *et al.*, 2003; Chen y Lee, 2004; Aliev *et al.*, 2007; Selim *et al.*, 2008 y Torabi y Hassini, 2008) establecen como función objetivo la maximización del nivel de servicio, mientras que dos referencias (Liang, 2008 y Liang y Cheng, 2008) fijan la minimización de entregas retrasadas como objetivo de su modelo. Por último, Sabri y Beamon (2000) establecen como objetivo la maximización de la flexibilidad, como objetivo complementario a la minimización de costes. Por último, dos referencias (Chen *et al.*, 2003 y Chen y Lee, 2004) establecen como objetivo la maximización de los niveles de inventarios de seguridad, simultáneamente con la maximización del beneficio y del nivel de servicio al cliente.

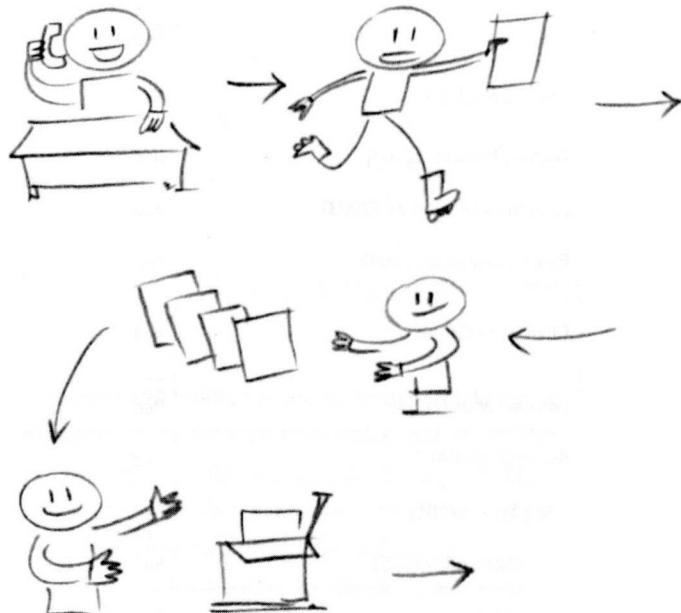


TABLA 2. Estructura CS, nivel de decisión y propósito para las referencias de estudio

	Estructura CS	Nivel de decisión	Propósito
Benjamin (1989)	Red	Táctico	Minimización de costes
Martin <i>et al.</i> (1993)	Red	Táctico	Maximización de beneficio
Chen y Wang (1997)	Red	Táctico	Maximización de beneficio
McDonald y Karimi (1997)	Red	Táctico	Maximización de beneficio
Barbarosoğlu y Özgür (1999)	Divergente	Táctico	Minimización de costes
Dogan y Goetschalckx (1999)	Red	Estratégico táctico	Minimización de costes
Lee y Kim (2000)	Red	Táctico	Minimización de costes
Sabri y Beamon (2000)	Red	Estratégico operativo	Minimización de costes Flexibilidad
Timpe y Kallrath (2000)	Red	Estratégico operativo	Maximización de ventas Maximización de beneficio
Dhaenens-Flipo y Finke (2001)	Red	Táctico	Minimización de costes
Jayaraman y Pirkul (2001)	Red	Estratégico táctico	Minimización de costes
Sakawa <i>et al.</i> (2001)	Red	Táctico	Minimización de costes
Bredström y Rönnqvist (2002)	Red	Táctico operativo	Minimización de costes
Goetschalckx <i>et al.</i> (2002)	Red	Estratégico táctico	Minimización de costes
Jang <i>et al.</i> (2002)	Red	Estratégico táctico	Minimización de costes
Kallrath (2002)	Red	Estratégico operativo	Minimización de costes Maximización de ventas Maximización de beneficio
Lee <i>et al.</i> (2002)	Red	Táctico	Minimización de costes
Lee y Kim (2002)	Red	Táctico	Minimización de costes
Chen <i>et al.</i> (2003)	Red	Táctico	Maximización de beneficio Maximización nivel de servicio
Gupta y Maranas (2003)	Red	Táctico	Minimización de costes
Jolayemi y Olorunniwo (2003)	Red	Táctico	Maximización de beneficio
Perea-López <i>et al.</i> (2003)	Red	Táctico	Maximización de beneficio
Chen y Lee (2004)	Red	Táctico	Maximización de beneficio Maximización nivel de servicio Maximización inventarios de seguridad
Lababidi <i>et al.</i> (2004)	Red	Táctico	Minimización de costes
Ryu <i>et al.</i> (2004)	Red	Táctico	Minimización de costes
Gen y Syarif (2005)	Red	Táctico	Minimización de costes
Kanyalkar y Adil (2005)	Red	Táctico operativo	Minimización de costes
Park (2005)	Red	Táctico	Maximización de beneficio
Tang <i>et al.</i> (2005)	Divergente	Operativo	Minimización de costes

continúa...

Continuación TABLA 2

	Estructura CS	Nivel de decisión	Propósito
Demirli y Yimer (2006)	Mixta	Táctico	Minimización de costes
Ekşioğlu <i>et al.</i> (2006)	Red	Táctico	Minimización de costes
Lim <i>et al.</i> (2006)	Red	Táctico	Minimización de costes
Oh y Karimi (2006)	Red	Táctico	Maximización de beneficio
Rizk <i>et al.</i> (2006)	Divergente	Operativo	Minimización de costes
Aliev <i>et al.</i> (2007)	Red	Táctico	Maximización de beneficio Maximización nivel de servicio
Bilgen y Ozkaraham (2007)	Red	Táctico	Minimización de costes
Chern y Hsieh (2007)	Red	Táctico	Minimización de costes
Ekşioğlu <i>et al.</i> (2007)	Red	Táctico	Minimización de costes
Meijboom y Obel (2007)	Red	Táctico	Maximización de beneficio
Pibernik y Sucky (2007)	Red	Táctico	Minimización de costes
Roghanian <i>et al.</i> (2007)	Red	Táctico	Minimización de costes
Tang <i>et al.</i> (2007)	Divergente	Operativo	Minimización de costes
Jung <i>et al.</i> (2008)	Red	Táctico	Maximización de beneficio
Liang (2008)	Red	Táctico	Minimización de costes Minimización entregas retrasadas
Liang y Cheng (2008)	Red	Táctico	Minimización de costes Minimización entregas retrasadas
Ouhimmou <i>et al.</i> (2008)	Red	Táctico	Minimización de costes
Rizk <i>et al.</i> (2008)	Divergente	Operativo	Minimización de costes
Selim <i>et al.</i> (2008)	Red	Táctico	Minimización de costes Maximización de beneficio Maximización nivel de servicio
Torabi y Hassini (2008)	Mixta	Táctico	Minimización de costes Maximización nivel de servicio
Das y Sengupta (2009)	Red	Estratégico táctico	Maximización de beneficio Minimización de costes
Peidro <i>et al.</i> (2009)	Red	Táctico	Minimización de costes
You y Grossmann (2008)	Red	Estratégico operativo	Maximización de beneficio

Fuente: elaboración propia.

### Información intercambiada

El proceso de intercambio de información relevante es crucial para una planificación efectiva de la producción y el transporte en la CS. En el caso de la planificación centralizada, esta información fluye desde cada nodo de la red hacia el nodo de la CS que tomará las decisiones y realizará la planificación de la misma. Según Huang *et al.* (2003), se puede clasificar la información intercambiada en seis categorías diferentes: producto, proceso, recursos, inventario, pedidos y planificación.

Entre la información relativa al producto destaca la estructura del producto, su lista de materiales, por su incidencia en la planificación de la producción. La información del proceso refleja detalles sobre las actividades llevadas a cabo por los diferentes nodos de la CS y sus características, tales como los tiempos de producción, costes de producción, costes por subcontratación, costes y tiempos de preparación, ingresos por ventas, etc. En cuanto a los recursos, la información trasvasada se centra en las capacidades de fabricación, el transporte, el almacenamiento

o el aprovisionamiento. En cuanto a la información intercambiada del inventario, se pueden resaltar los niveles de inventario, los costes de inventario, en el que se incluirán los de posesión y penalizaciones por roturas de *stocks*, los costes por demanda insatisfecha o retrasada y los niveles de servicio o flexibilidad. Las informaciones relativas a los pedidos recogen, principalmente, datos sobre las fechas límite de entrega de los pedidos. Por último, las informaciones relativas a la planificación recogen datos como la previsión de la demanda realizada, la programación de los pedidos o el modelo de previsión utilizado. Estos aspectos se resumen en la tabla 3.

De esta manera, del total de referencias estudiadas y de acuerdo con la Tabla 3, se destaca que en la mayoría de ellas el intercambio de información es relativo a los costes de fabricación y transporte. Además, tan sólo cinco referencias (Kanyalkar y Adil, 2005; Tang *et al.*, 2005; Rizk *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2007 y Rizk *et al.*, 2008) no contemplan los costes de fabricación, al igual que los costes de transporte que no son contemplados en Martin *et al.*

(1993) y en Meijboom y Obel (2007). Otras informaciones relativas al proceso, tales como los tiempos de fabricación, transporte o preparación, aparecen como parámetros de intercambio en menor medida. En cuanto a la información intercambiada relativa a los inventarios, destaca como parámetro mayoritario de intercambio el coste de posesión de *stocks*, presente también en la gran mayoría de referencias estudiadas, ya que tan sólo cinco de ellas no lo contemplan. En cuanto a la información relativa a la disponibilidad de los recursos, destaca el intercambio mayoritario de la capacidad de fabricación y, en menor medida, de informaciones relativas a las capacidades de almacenamiento, aprovisionamiento o transporte. Asimismo, el intercambio de la información relativa a las fechas límite de los pedidos aparece únicamente en dos referencias (Sabri y Beamon, 2000, y Chern y Hsieh, 2007), en contraposición a la información relativa al nivel de demanda, la cual se intercambia entre los diferentes nodos de las cadenas de suministro contempladas en la totalidad de las referencias exceptuando los trabajos de Benjamin (1989) y Dhaenens-Flipo y Finke (2001).

TABLA 3. Información intercambiada para las referencias de estudio

	Estructura de producto	Tiempo de fabricación	Coste de fabricación	Tiempo de transporte	Coste de transporte	Tiempo de preparación	Coste de preparación	Coste de subcontratación	Coste de aprovisionamiento	Ingresos/beneficios por ventas	Niveles de inventario	Costes de inventario	Coste de demanda insatisfecha	Nivel de servicio/flexibilidad	Capacidad de fabricación	Capacidad de transporte	Capacidad de almacenamiento	Capacidad de aprovisionamiento	Flexibilidad (volumen o fecha entrega)	Fecha límite de pedido	Demandas
Benjamin (1989)		X	X		X	X		X			X										X
Martin <i>et al.</i> (1993)			X							X	X	X	X				X				X
Chen y Wang (1997)	X	X	X					X							X		X				X
McDonald y Karimi (1997)			X	X				X	X	X	X	X		X							X
Barbarosoğlu y Özgür (1999)	X	X	X					X			X			X							X
Dogan y Goetschalckx (1999)			X	X	X			X	X		X			X		X	X	X			X
Lee y Kim (2000)	X	X	X	X	X			X		X		X		X	X	X					X
Sabri y Beamon (2000)	X	X	X		X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
Timpe y Kallrath (2000)	X		X	X	X	X		X		X	X			X		X	X				X
Dhaenens-Flipo y Finke (2001)	X	X		X	X						X	X		X							
Jayaraman y Pirkul (2001)	X		X					X						X			X		X		X
Sakawa <i>et al.</i> (2001)			X		X									X							X
Bredström y Rönnqvist (2002)	X		X		X						X	X		X	X						X
Goetschalckx <i>et al.</i> (2002)			X	X	X			X	X		X			X	X	X	X				X
Jang <i>et al.</i> (2002)	X	X	X		X						X			X							X
Kallrath (2002)	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X		X			X				X
Lee <i>et al.</i> (2002)	X	X	X	X	X						X	X	X				X				X
Lee y Kim (2002)	X	X	X	X	X						X	X	X	X	X						X

continúa...

Continuación TABLA 3

	Estructura de producto	Tiempo de fabricación	Coste de fabricación	Tiempo de transporte	Coste de transporte	Tiempo de preparación	Coste de preparación	Coste de subcontratación	Coste de aprovisionamiento	Ingresos/beneficios por ventas	Niveles de inventario	Costos de inventario	Coste de demanda insatisfecha	Nivel de servicio/flexibilidad	Capacidad de fabricación	Capacidad de transporte	Capacidad de almacenamiento	Capacidad de aprovisionamiento	Flexibilidad (volumen o fecha entrega)	Fecha límite de pedido	Demandas
Chen <i>et al.</i> (2003)		X	X	X	X		X													X	
Gupta y Maranas (2003)	X	X		X			X	X	X	X			X		X					X	
Jolayemi y Olorunniwo (2003)		X		X		X	X		X			X		X		X				X	
Perea-López <i>et al.</i> (2003)	X	X	X	X		X		X	X	X	X										X
Chen y Lee (2004)		X	X	X		X				X	X					X	X				X
Lababidi <i>et al.</i> (2004)	X		X				X	X		X	X		X		X	X					X
Ryu <i>et al.</i> (2004)			X	X								X			X	X					X
Gen y Syarif (2005)	X		X									X			X						X
Kanyalkar y Adil (2005)	X				X					X	X				X						X
Park (2005)			X		X	X							X		X	X					X
Tang <i>et al.</i> (2005)					X	X						X	X		X	X					X
Demirli y Yimer (2006)	X		X		X			X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Ekşioğlu <i>et al.</i> (2006)			X		X		X					X			X	X					X
Lim <i>et al.</i> (2006)	X	X	X		X							X			X						X
Oh y Karimi (2006)	X		X		X			X		X		X			X	X	X	X			X
Rizk <i>et al.</i> (2006)	X	X		X	X	X						X			X						X
Aliev <i>et al.</i> (2007)			X		X						X	X			X	X					X
Bilgen y Ozkaraham (2007)	X		X		X							X			X	X	X				X
Chern y Hsieh (2007)	X	X	X	X	X			X				X	X		X	X				X	X
Ekşioğlu <i>et al.</i> (2007)			X		X		X					X			X						X
Meijboom y Obel (2007)	X		X						X	X					X						X
Pibernik y Sucky (2007)	X	X	X		X	X					X			X		X					X
Roghianian <i>et al.</i> (2007)			X		X						X			X		X					X
Tang <i>et al.</i> (2007)					X	X					X	X		X	X	X	X				X
Jung <i>et al.</i> (2008)			X		X					X	X				X	X					X
Liang (2008)	X	X	X	X			X				X	X		X	X	X	X				X
Liang y Cheng (2008)	X	X	X	X			X				X	X		X	X	X	X				X
Ouhimmou <i>et al.</i> (2008)	X	X		X		X		X	X		X			X			X			X	
Rizk <i>et al.</i> (2008)	X	X		X	X	X	X					X			X	X					X
Selim <i>et al.</i> (2008)		X	X		X						X	X		X	X	X	X				X
Torabi y Hassini (2008)	X		X		X				X		X	X		X		X	X	X			X
Das y Sengupta (2009)	X		X	X	X			X	X	X		X			X	X	X				X
Pedro <i>et al.</i> (2009)	X	X	X	X	X			X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
You y Grossmann (2008)		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X		X	X	X	X	X	

Fuente: elaboración propia.

Según lo mostrado en las tablas 2 y 3, se ha analizado un total de 52 referencias bibliográficas. Estas presentan diversos tipos de modelos de programación matemática para la planificación de la producción y el transporte en la CS. Así, pueden encontrarse modelos que contemplan tanto aspectos tácticos como estratégicos o que puedan ser modelados mediante programación lineal entera mixta y resueltos con algoritmos heurísticos. Además, de

las referencias estudiadas, un total de 45 (86,54%), contemplan en sus modelos matemáticos la CS con una topología en red. Asimismo, la estructura divergente de la CS se encuentra en cinco referencias (9,62%). Por otro lado, la estructura mixta tan sólo aparece en dos de las referencias analizadas, no contemplándose la estructura convergente en ninguna de ellas. En lo referente al nivel de decisión, cinco de las referencias de estudio, lo que repre-

senta el 9,36% de las mismas, presentan modelos de planificación centrados en los niveles estratégico y táctico de manera simultánea. De la misma forma, cuatro referencias presentan modelos de planificación basados en aspectos de carácter estratégico y operativo. Un total de 37 referencias bibliográficas (71,15%) proponen modelos de carácter táctico y otras dos (3,85%) se centran en aspectos de carácter táctico y operativo de forma simultánea, mientras que cuatro referencias desarrollan modelos para la toma de decisiones de carácter operativo. En cuanto al propósito, un total de 38 referencias, lo que representa el 73,08% de las mismas, establecen la minimización de los costes en la función objetivo, mientras que 17 (32,69%) persiguen la maximización del beneficio. Por otro lado, aparecen cinco referencias (9,62%) en las que se formula la maximización del nivel de servicio como propósito; dos referencias (3,85%) en las que se establece la maximización del cumplimiento del nivel objetivo de los inventarios de seguridad y dos referencias cuyo objetivo es la minimización de las entregas retrasadas. La maximización de la flexibilidad y la maximización de la robustez frente a la incertidumbre aparecen como objetivos en una referencia bibliográfica (1,92%) cada uno. Por último, en lo que respecta a la información intercambiada, un total de 50 referencias, lo que representa el 96,15% de las mismas, consideran como parámetro de intercambio los costes de transporte. Los costes de fabricación también son contemplados en 39 referencias (90,38%), así como la demanda que también es considerada en 49 referencias (94,23%). Otros de los costes manejados en 47 referencias (90,38%) son el coste de posesión de inventarios y el coste de aprovisionamiento, que aparecen en 17 referencias (32,69%) y el coste de preparación que aparece en 17 referencias (32,69%). En cuanto a las diferentes capacidades, 46 (88,46%) referencias contemplan la capacidad de fabricación de sus nodos, 25 referencias la capacidad de almacenamiento (48,08%), 20 referencias (38,46%) la capacidad de transporte y nueve referencias (17,31%) la capacidad de aprovisionamiento. Por otro lado, los tiempos de fabricación aparecen como parámetro en 18 referencias (34,62%), mientras que el tiempo de transporte lo hace en 15 (28,85%), y tan sólo en cuatro (7,69%) el tiempo de preparación.

De los 52 trabajos analizados, 22 de ellos presentan su validación mediante su aplicación en casos reales.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un análisis sobre los modelos de programación matemática para la planificación de la producción y el transporte. Para el estudio de las referencias analizadas se ha propuesto una clasificación basada en el análisis de seis aspectos: estructura de la CS, nivel

de decisión, enfoque de modelado, propósito, información intercambiada y aplicación práctica.

Como conclusiones de este trabajo se puede afirmar que: 1) la gran mayoría de los modelos estudiados contempla una topología de la CS en forma de red para la planificación de la producción y del transporte orientados al nivel de decisión táctico; 2) el enfoque de modelado más frecuente es la programación lineal entera, destacando el uso de algoritmos heurísticos y metaheurísticos para la resolución; 3) el propósito mayoritario es la minimización de los costes en toda la CS, y en menor medida, la maximización del beneficio; 4) respecto al intercambio de informaciones, destacan el nivel de demanda, los costes de producción, transporte e inventario y la capacidad de fabricación; 5) en la mayoría de los trabajos abordados no se consideran los proveedores integrados dentro de la CS, y se contempla mayoritariamente la estructura formada por los centros de fabricación y de distribución. Así, se tienen presentes de forma general los costes o las capacidades de aprovisionamiento de materias primas, pero no se tienen en cuenta aspectos relativos a la capacidad de producción, previsiones o planes de producción de los proveedores, y 6) existe un mayor número de modelos propuestos validados mediante ejemplos numéricos que con casos de estudio de cadenas de suministro reales.

Después de esta revisión, se señalan los vacíos detectados en la literatura con propuestas de líneas futuras de investigación: 1) estudio de la integración o jerarquización de los niveles de planificación táctica y operativa de la producción y el transporte en el contexto de CS; 2) estudio de la integración de los nodos de los proveedores en los modelos de optimización de la CS; 3) consideración de los diferentes modos de transporte, *full truck load*, grupaje, *milk round*, rutas (Hernández *et al.*, 2008), de productos entre los diferentes nodos de la CS; 4) estudio de los aspectos relativos al proceso de producción utilizado y la relación de las políticas de inventarios con los modos de transporte; 5) propuesta de una arquitectura para la planificación colaborativa que gestione la información intercambiada entre los nodos de la CS; 6) estudio comparativo entre los escenarios de planificación centralizada y descentralizada en la CS; 7) evaluación de los resultados de más aplicaciones prácticas, y 8) estudio de la integración de las herramientas de optimización, simulación, optimización fuzzy, sistemas multiagente y algoritmos evolutivos que puedan dar soporte a las líneas de investigación planteadas.

## AGRADECIMIENTOS

Parte de este trabajo está financiado por el Proyecto Nacional del Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) del Gobierno español, titulado: Modelos de optimización fuzzy y

computación evolutiva y de simulación de los procesos de planificación de la producción y del transporte en una cadena de suministro. Propuesta de planificación colaborativa soportada por sistemas multi-agente. Integración en un sistema de decisión. Aplicaciones (Ref. DPI2007-65501), y parte por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Politécnica de Valencia (PAID-05-08) y la Generalitat Valenciana. Asimismo, esta investigación fue financiada mediante una beca doctoral concedida por el Ministerio de Educación del Gobierno de España al tercer autor (AP2008-01968). [www.cigip.upv.es/evolution](http://www.cigip.upv.es/evolution)

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aliev, R. A., Fazlollahi, B., Guirimov, B. G. & Aliev, R. R. (2007). Fuzzy-genetic approach to aggregate production-distribution planning in supply chain management. *Information Sciences*, 177(20), 4241-4255.
- Barbarosoğlu, G. & Özgür, D. (1999). Hierarchical design of an integrated production and 2-echelon distribution system. *European Journal of Operational Research*, 118(3), 464-484.
- Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281-294.
- Beamon, B. M. & Chen, V. C. P. (2001). Performance analysis of conjoined supply chains. *International Journal of Production Research*, 39(14), 3195-3218.
- Benjamin, J. (1989). An analysis of inventory and transportation cost in a constrained network. *Transportation Science*, 23(3), 177-183.
- Bilgen, B. & Ozkarahan, I. (2004). Strategic tactical and operational production-distribution models: a review. *International Journal of Technology Management*, 28(2), 151-171.
- Bilgen, B. & Ozkarahan, I. (2007). A mixed-integer linear programming model for bulk grain blending and shipping. *International Journal of Production Economics*, 107(2), 555-571.
- Bredstrom, D. & Ronqvist, M. (2002). *Integrated production planning and route scheduling in pulp mill industry*. Proceedings of the 35th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, 2002. HICSS.
- Chen, C. L. & Lee, W. C. (2004). Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6-7), 1131-1144.
- Chen, M. & Wang, W. (1997). A linear programming model for integrated steel production and distribution planning. *International Journal of Operations & Production Management*, 17(6), 592-610.
- Chen, C. L., Wang, B. W. & Lee, W. C. (2003). Multiobjective optimization for a multienterprise supply chain network. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(9), 1879-1889.
- Chern, C. C. & Hsieh, J. S. (2007). A heuristic algorithm for master planning that satisfies multiple objectives. *Computers & Operations Research*, 34(11), 3491-3513.
- Das, K. & Sengupta, S. (2009). A hierarchical process industry production-distribution planning model. *International Journal of Production Economics*, 117(2), 402-419.
- Demirli, K. & Yimer, A. (2006). *Production-Distribution Planning with Fuzzy Costs* (pp. 702-707). Annual meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, 2006. NAFIPS 2006.
- Dhaenens-Flipo, C. & Finke, G. (2001). An integrated model for an industrial production-distribution problem. *IIE Transactions*, 33(9), 705-715.
- Dogan, K. & Goetschalckx, M. (1999). A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems. *IIE Transactions*, 31(11), 1027-1036.
- Dullaert, W., Bräysy, O., Goetschalckx, M. & Raa, B. (2007). Supply chain (re)design: Support for managerial and policy decisions. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 7(2), 73-92.
- Ekşioğlu, S. D., Romeijn, H. E. & Pardalos, P. M. (2006). Cross-facility management of production and transportation planning problem. *Computers & Operations Research*, 33(11), 3231-3251.
- Ekşioğlu, S. D., Ekşioğlu, B. & Romeijn, H. E. (2007). A Lagrangean heuristic for integrated production and transportation planning problems in a dynamic, multi-item, two-layer supply chain. *IIE Transactions*, 39(2), 191-201.
- Erenguc, S. S., Simpson, N. C. & Vakharia, A. J. (1999). Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review. *European Journal of Operational Research*, 115(2), 219-236.
- Gen, M. S. & Syarif, A. (2005). Hybrid genetic algorithm for multi-time period production/distribution planning. *Computers & Industrial Engineering*, 48(4), 799-809.
- Goetschalckx, M., Vidal, C. J. & Dogan, K. (2002). Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. *European Journal of Operational Research*, 143(1), 1-18.
- Gupta, A. & Maranas, C. D. (2003). Managing demand uncertainty in supply chain planning. *Computers & Chemical Engineering*, 27(8-9), 1219-1227.
- Huang, G. Q., Lau, J. S. K. & Mak, K. L. (2003). The impacts of sharing production information on supply chain dynamics: a review of the literature. *International Journal of Production Research*, 41(7), 1483-1517.
- Hernández, J. E., Mula, J., Ferriols, F. J. & Poler, R. (2008). A conceptual model for the production and transport planning process: An application to the automobile sector. *Computers in Industry*, 59(8), 842-852.
- Jang, Y. J., Jang, S. Y., Chang, B. M. & Park, J. (2002). A combined model of network design and production/distribution planning for a supply network. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2), 263-281.
- Jayaraman, V. & Pirkul, H. (2001). Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. *European Journal of Operational Research*, 133(2), 394-408.
- Jolayemi, J. K. & Olorunniwo, F. O. (2004). A deterministic model for planning production quantities in a multi-plant, multi-warehouse environment with extensible capacities. *International Journal of Production Economics*, 87(2), 99-113.
- Jung, H., Jeong, B. & Lee, C. G. (2008). An order quantity negotiation model for distributor-driven supply chains. *International Journal of Production Economics*, 111(1), 147-158.
- Kallrath, J. (2002). Combined strategic and operational planning - an MILP success story in chemical industry. *OR Spectrum*, 24(3), 315-341.
- Kanyalkar, A. P. & Adil, G. K. (2005). An integrated aggregate and detailed planning in a multi-site production environment using linear programming. *International Journal of Production Research*, 43(20), 4431-4454.
- Lababidi, H. M. S., Ahmed, M. A., Alatiqi, I. M. & Al-Enzi, A. F. (2004). Optimizing the supply chain of a petrochemical company under uncertain operating and economic conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(1), 63-73.

- Lee, Y. H. & Kim, S. H. (2000). *Optimal production-distribution planning in supply chain management using a hybrid simulation-analytic approach* (Vols. 1-2, pp.1252-1259). Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference.
- Lee, Y. H. & Kim, S. H. (2002). Production-distribution planning in supply chain considering capacity constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2), 169-190.
- Lee, Y. H., Kim, S. H. & Moon, C. (2002). Production-distribution planning in supply chain using a hybrid approach. *Production Planning & Control*, 13(1), 35-46.
- Liang, T. (2008). Fuzzy multi-objective production/distribution planning decisions with multi-product and multi-time period in a supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 55(3), 676-694.
- Liang, T. -F. & Cheng, H. -W. (2008). Application of fuzzy sets to manufacturing/distribution planning decisions with multi-product and multi-time period in supply chains. *Expert Systems with Applications*, 36(2, Parte 2), 3367-3377.
- Lim, S. J., Jeong, S. J., Kim, K. S. & Park, M. W. (2006). A simulation approach for production-distribution planning with consideration given to replenishment policies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27 (5-6), 593-603.
- Martin, C. H., Dent, D. C. & Eckhart, J. C. (1993). Integrated Production, Distribution, and Inventory Planning at Libbey-Owens-Ford. *Interfaces*, 23(3), 68-78.
- McDonald, C. M. & Karimi, I. A. (1997). Planning and scheduling of parallel semicontinuous processes .1. Production planning. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(7), 2691-2700.
- Meijboom, B. & Obel, B. (2007). Tactical coordination in a multi-location and multi-stage operations structure: A model and a pharmaceutical company case. *Omega-International Journal of Management Science*, 35(3), 258-273.
- Oh, H. C. & Karimil, I. A. (2006). Global multiproduct production-distribution planning with duty drawbacks. *Aiche Journal*, 52(2), 595-610.
- Ouhimmou, M., D'Amours, S., Beauregar, R., Ait-Kadi, D. & Singh Chauhan, S. (2008). Furniture supply chain tactical planning optimization using a time decomposition approach. *European Journal of Operational Research*, 189(3), 952-970.
- Park, Y. B. (2005) An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management. *International Journal of Production Research*, 43 (6), 1205-1224.
- Pedro, D., Mula, J., Poler, R. & Verdegay, J. L. (2009). *Fuzzy optimization for supply chain planning under supply, demand and process uncertainties*. *Fuzzy Sets and Systems*. In Press, doi: 10.1016/j.fss.2009.02.021
- Perea-López, E., Ydstie, B. E. & Grossmann, I. E. (2003). A model predictive control strategy for supply chain optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 27(8-9), 1201-1218.
- Pibernik, R. & Sucky, E. (2007). An approach to inter-domain master planning in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 108(1-2), 200-212.
- Rizk, N., Martel, A. & D'Amours, S. (2006) Multi-item dynamic production-distribution planning in process industries with divergent fin-
- ishing stages. *Computers & Operations Research*, 33(12), 3600-3623.
- Rizk, N., Martel, A. & D'Amours, S. (2008). Synchronized production-distribution planning in a single-plant multi-destination network. *Journal of the Operational Research Society*, 59, 90-104.
- Roghani, E., Sadjadi, S. J. & Aryanezhad, M. B. (2007). A probabilistic bi-level linear multi-objective programming problem to supply chain planning. *Applied Mathematics and Computation*, 188(1), 786-800.
- Ryu, J. H., Dua, V. & Pistikopoulos, E. N. (2004). A bilevel programming framework for enterprise-wide process networks under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6-7), 1121-1129.
- Sabri, E. H. & Beamon, B. M. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega-International Journal of Management Science*, 28(5), 581-598.
- Sakawa, M., Nishizaki, I. & Uemura, Y. (2001). Fuzzy programming and profit and cost allocation for a production and transportation problem. *European Journal of Operational Research*, 131(1), 1-15.
- Schmidt, G. y Wilhelm, W. E. (2000). Strategic, tactical and operational decisions in multi-national logistics networks: a review and discussion of modelling issues. *International Journal of Production Research*, 38(7), 1501-1523.
- Selim, H., Am, C. & Ozkarahan, I. (2008). Collaborative production-distribution planning in supply chain: A fuzzy goal programming approach. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 44(3), 396-419.
- Shah, N. (2005). Process industry supply chains: Advances and challenges. *Computers & Chemical Engineering*, 29 (6), 1225-1235.
- Stadtler, H. (2005). Supply chain management and advanced planning - basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163(3), 575-588.
- Tang, J., Yung, K. L. & Liu, S. (2005). *Lagrange relaxation decomposition for synchronized production and transportation planning with flexible vehicles*. *Services Systems and Services Management*, 2005 (Vol. 1, pp. 357-361). Proceedings of ICSSSM '05. 2005 International.
- Tang, J., Yung, K. L., Ip, A. W. H. y Liu, S. (2007). Synchronized Production and Transportation Planning Using Subcontracted Vehicles in a Production-Distribution Network. *Transportation Planning & Technology*, 30(2/3), 113-146.
- Timpe, C. H. & Kallrath, J. (2000). Optimal planning in large multi-site production networks. *European Journal of Operational Research*, 126(2), 422-435.
- Torabi, S. A. & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy Sets and Systems*, 159(2), 193-214.
- 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), 1-18.
- You, F. & Grossmann, I. E. (2008). Design of responsive supply chains under demand uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, 32(12), 3090-3111.