

## CAPÍTULO III

### MODELADO BASADO EN AGENTES DE UNA CADENA DE SUMINISTRO COMPUESTA DE PEQUEÑAS EMPRESAS

MATEO PACHÓN RINCÓN<sup>15</sup>

---

15 Profesor universitario de la Institución Universitaria Politécnico Grancolombiano, Ingeniero Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, Magister en Ingeniería en la especificidad de Automatización Industrial – Universidad Nacional de Colombia, MIT Graduate Certificate in Logistics and Supply Chain Management (GCLOG). Realización de múltiples proyectos de investigación en el área de logística y gestión de la cadena de suministro. Correo electrónico: mpachonr@poligran.edu.co

## INTRODUCCIÓN

Una CS se compone de una red de organizaciones que se involucran a través de vínculos aguas-arriba y/o aguas-abajo buscando proveer servicios y productos al consumidor final (Christopher, 1998), flujos físicos, de información y financieros interconectan a los participantes elementos de la CS. A la vista del consumidor final la responsabilidad de la competitividad del producto no recae sobre empresas autónomas sino sobre la CS como un todo (Stadler, 2000), este enfoque holístico muestra la necesidad de llevar a cabo una aproximación que apunte a administrar todo el espectro de interacciones que ocurren en la CS. Esta aproximación se logra con la gestión de la CS. El objetivo primordial de esta es conseguir un nivel predeterminado de servicio mientras se minimizan los costos totales de la CS (Lee & Billington, 1993), sin embargo es claro que esta tarea de optimización no puede ser llevada a cabo de forma individual, ya que puede resultar en óptimos locales y sub-optimización si no se considera la CS como un todo (Cachon, 1999), para evitar esta reacción indeseable, la gestión de la CS utiliza la coordinación como la herramienta para considerar los objetivos globales. Cuando los elementos de la cadena de suministro colaboran entre si lo denominamos coordinación, en contraposición cuando los nodos de la cadena de suministro toman decisiones no cooperativas, en este caso se puede llegar a un equilibrio por ejemplo a equilibrio de Nash o de Stackelberg (Maw-Sheng Chern, 2014).

En este sentido los nodos individuales de la red logística buscan mejorar sus indicadores, y como segundo objetivo no desmejorar los indicadores de sus nodos interactuantes, este segundo objetivo puede ser explícito en el sentido de que se genera por medio del diseño de los agentes y el software, por ejemplo al simular contratos entre vendedores y compradores, o implícito como resultado emergente de la interacción en la corrida del simulador. Debido a que la información para los diferentes agentes es restringida se tiene la necesidad de que cada agente independiente y autónomo en la cadena de suministro decida basado en la información que tiene (Maw-Sheng Chern, 2014) (Mingming Leng, 2009).

La coordinación como esencia de la gestión de la CS, enfocándose en eliminar la sub-optimización que ocurre en la misma (Fugate, Sahin, & Mentzer, 2006), los esfuerzos coordinados buscan cambiar los resultados de la operación del sistema interviniendo en los procesos de decisión existentes en las diferentes organizaciones de la CS y generando situaciones ganadora-gana.

Los esfuerzos para coordinar estructuras descentralizadas son mayores, al existir diferentes objetivos entre los decisores de cada organización, la simulación como herramienta es viable para evaluar los posibles resultados a nivel agregado, usando mecanismos de coordinación específicos (Arshinder K. K., 2011), especialmente porque el modelado por medio de métodos analíticos implica la adopción de supuestos demasiado fuertes que no representan las condiciones reales, limitando el modelado a entornos específicos y fallando al representar comportamientos dinámicos (Lee, Cho, & Kim, 2002). Por medio de la simulación el sistema real es modelado y las decisiones se soportan a través de las corridas del simulador, permitiendo observar los posibles resultados y contribuyendo a la comprensión del sistema observado (Manuj, Mentzer, & Bowers, 2009).

La simulación basada en agentes es un paradigma que parte de modelar estructuras desde el comportamiento individual de sus componentes, permitiendo que el comportamiento sistémico emerja desde las reglas de operación individuales de las unidades fundamentales llamadas agentes, esta propiedad resulta ser beneficiosa para la representación de CS descentralizadas. Dada la naturaleza autónoma de las decisiones y la presencia de patrones de comportamiento humanos en los procesos de toma de decisiones (Tokar, 2010). Además las dificultades en materia de recursos, así como el uso de tecnologías de la información y las comunicaciones, los nuevos conocimientos y las limitaciones de información hacen que sus procesos de decisión se alejen cada vez más de ser racionales y mucho menos de que sus objetivos promuevan un buen desempeño agregado del sistema.

En este artículo se desarrolla un método para el modelado de una CS por medio de la técnica de agentes. Los elementos del artículo siguen el siguiente orden: primero, una revisión de la literatura relevante del tema, segundo, formulación de método para el modelado de CS por medio de agentes, tercero, el método propuesto se ejemplifica por medio de un caso real en el cual se observan comportamientos de los agentes partiendo de la diferencia en la toma de decisiones en cuanto al reaprovisionamiento y finalmente se lleva a cabo una discusión sobre las conclusiones, así como los posibles trabajos futuros.



# REVISIÓN DE LA LITERATURA

## Coordinación en la Cadena de Suministro

La optimización individual de los componentes de un sistema industrial ha estado asociada con numerosas desventajas que afectan el sistema completo, estas desventajas han sido documentadas desde mediados del siglo anterior (Forrester, 1958), (Sprengler, 1950) (Lee, Padmanabhan, & Whang, 1997), por este motivo la administración de la CS busca integrar las funciones de la CS para ofrecer un mayor valor al cliente final (Lambert, 2004), por medio de la coordinación de los flujos físicos, de información y financieros (Fugate, Sahin, & Mentzer, 2006), (Sahin & Robinson, 2002).

La coordinación aparece como un tema de investigación interdisciplinario que integra un conjunto de disciplinas como la ciencia computacional, teoría organizacional, investigación de operaciones, economía, lingüística y sicología (Malone & Crowston, 1994), definida como “la administración de las dependencias entre actividades”. En el contexto de la CS la utilización de coordinación es una actividad esencial de la administración de la CS (Fugate, Sahin, & Mentzer, 2006), sin embargo no existe consenso en una definición y el concepto es compartido con otros sustantivos como integración, colaboración o cooperación, con base a lo propuesto por Arshinder A. K. (2011).

A pesar de no existir consenso en su definición los beneficios potenciales de la coordinación han sido documentados por diversos autores, por ejemplo (Sahin & Robinson, 2002) encontraron que se podrían percibir ahorros de hasta el 35% de los costos totales del sistema. Sin embargo

para que exista una coordinación efectiva y estos beneficios puedan ser percibidos es necesario superar dos barreras: la desalineación de las metas entre los actores y la asimetría de la información, para lograr este objetivo la coordinación debe valerse de medios o herramientas conocidos como mecanismos de coordinación (Arshinder A. K., 2008).

## Mecanismos de Coordinación

El diseño de mecanismos de coordinación que busquen solucionar problemas específicos de coordinación en diferentes cadenas de suministro es uno de los ejes principales de la administración de la CS (Fugate, Sahin, & Mentzer, 2006), en la literatura se encuentra un amplio cuerpo de conocimiento dedicado a la formulación, evaluación y generalización de posibles mecanismos de coordinación, de acuerdo a (Arshinder A. K., 2008), los mecanismos de coordinación pueden ser clasificados en cuatro categorías: (i) contratos, que funcionan como medios para formalizar las decisiones logísticas (cantidad, precio, tiempo, calidad) entre los actores de la cadena; (ii) tecnologías de información, que automatizan y mejoran la administración de la información y la comunicaciones entre actores; (iii) intercambio de información, reduciendo la asimetría de la información entre los actores y soportando mejores procesos de toma de decisiones y finalmente (iv) toma de decisiones conjuntas; que consiste en procesos conjuntos para tomar diferentes decisiones, principalmente logísticas.

La complejidad que existe en el diseño de mecanismos de coordinación radica en la necesidad de considerar diferentes aspectos característicos de las organizaciones, por ejemplo, el comportamiento humano, la tecnología, las

relaciones de poder, las estrategias empresariales entre otros. La Ilustración 1 identifica las principales taxonomías de mecanismos de coordinación incluyendo algunos mecanismos como ejemplo.

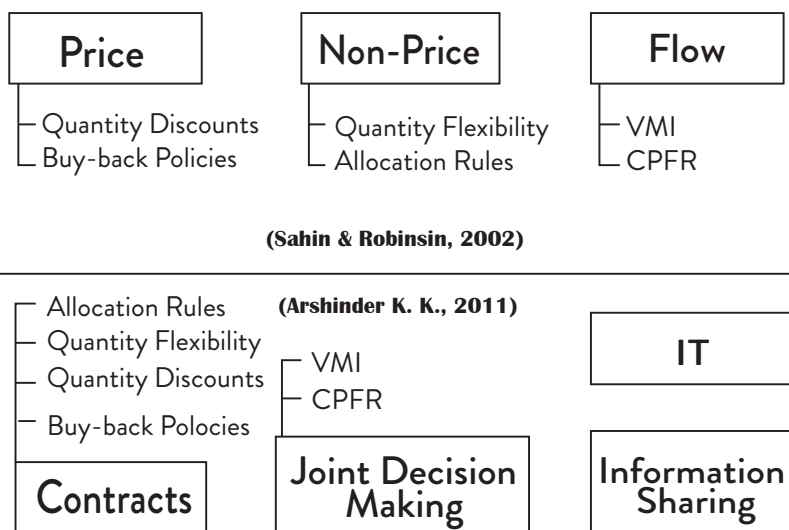


Ilustración 1. Mecanismos de Coordinación en la CS. Adaptada de (Arshinder K. K., 2011) y (Sahin & Robinson, 2002)

## Estructuras de Organización en la Cadena de Suministro

De acuerdo a (Whang, 1995) existen tres posibles estructuras de organización identificadas en la CS: (i) un solo tomador de decisiones que dispone de toda la información e intenta optimizar el desempeño global del sistema, es decir una CS centralizada, (ii) coordinación colaborativa entre las organizaciones que componen la CS, cada organización tiene una

cantidad limitada de información disponible así que necesitan comunicarse y coordinar para conseguir los objetivos globales y (iii) un nexo de contratos entre agentes con interés propio en el que cada uno intenta maximizar sus objetivos individuales. En el esquema de control centralizado las decisiones son realizadas de forma central basándose en la información del sistema completo (Lee & Billington, 1993) lo que permite alcanzar buenos niveles de desempeño (Li & Wang, 2007), sin embargo en la práctica este esquema de organización puede llegar a ser irreal en muchas situaciones (de Souza, Zice, & Chaoyang, 2000), por lo que es de interés abordar los otros dos esquemas identificados, cuyo entorno es el de la descentralización.

El control descentralizado hace referencia a los esquemas en los que cada organización toma las decisiones basándose solamente en la información a nivel local (Lee & Billington, 1993) y de forma autónoma, también se asocia a la existencia de múltiples tomadores de decisión en distintos niveles de la CS (Giannocaro & Pontrandolfo, 2004). El problema de cómo coordinar actores independientes para alcanzar niveles óptimos en la asignación de recursos y el desempeño global de la CS es una tarea compleja al carecer de un control central (Malone & Crowston, 1994), abordar este sólo problema no es suficiente, mecanismos de coordinación específicos deben ser considerados los cuales garanticen que se generen situaciones gana-gana: es decir que cada actor perciba por los menos los mismos beneficios que percibía antes de implementar la iniciativa de coordinación, de otra forma no se verá motivado a participar en la misma (de Souza, Zice, & Chaoyang, 2000).

Los esfuerzos en coordinación descentralizada pueden encontrarse desde (Monahan, 1984) y (Banerjee, 1986) en los que se analiza la relación diádica entre proveedor-comprador para el control de inventarios del

sistema, a diferencia de los modelos tradicionales de inventarios el objetivo es optimizar los beneficios económicos de la diada. En los últimos años diferentes, innovadoras y exitosas prácticas de coordinación han surgido desde los ambientes empresariales y han sido analizadas desde la literatura; Information Sharing (IS), Collaborative Replenishment Programs (CRP) and Vendor Managed Inventory (VMI), son algunas de las iniciativas de coordinación con mayor reconocimiento (Yao Y. D., 2008). A pesar de la existencia de diversos artículos que analizan las ventajas y desventajas de estas iniciativas utilizando métodos analíticos, la complejidad matemática de los modelos hace necesario recurrir a supuestos muy fuertes para su desarrollo (Größler & Schieritz, 2005).

## Coordinación descentralizada

Yao, Evers, y Dresner (2007) evalúan la implementación de VMI en el problema del dimensionamiento de lote conjunto en una diada comprador – vendedor, sin embargo se asume que sólo un artículo fluye a lo largo de la cadena, una demanda determinística y uniforme, información disponible en ambas partes (simétrica), un lead time despreciable, interés en las dos partes de participar en la iniciativa y finalmente los costos de transportes están implícitos en el costo del producto.

Finalmente (Darwish & Odah, 2010) analizan el problema de dimensionamiento de lote desde la perspectiva de múltiples compradores y un sólo vendedor con la implementación de VMI, en este modelo la demanda es determinística y uniforme. Se asume que la información está disponible para los actores y que éstos tienen los suficientes incentivos

como para participar en la iniciativa, igualmente el costo de transporte está incluido en el precio del producto. Desde esta breve descripción y tomando como ejemplo la coordinación por medio de VMI es posible observar cómo para mitigar la complejidad del modelado se deben realizar un número de supuestos que son comunes a los diferentes trabajos, sin embargo pueden carecer de elementos al ser contrastados con el funcionamiento real de una CS.

Adicionalmente una CS posee interdependencias distribuidas en grandes extensiones geográficas y con diversas heterogeneidades entre sus actores, por lo cual hacen que la simulación pueda ser una herramienta apropiada en muchos casos (Manuj, Mentzer, & Bowers, 2009), esta situación ha hecho que tanto académicos como empresarios tengan más en cuenta la simulación para el desarrollo de investigaciones (Davis-Sramek & Fugate, 2007) (Arshinder K. K., 2011), debido a su capacidad de convertirse en un laboratorio computacional de la CS, en el cual los problemas reales son abstraídos y codificados para ser analizados, resueltos, optimizados o mitigados y finalmente codificados de nuevo en la CS real por medio de soporte a las decisiones o políticas (Borshchev & Filippov, 2004). Sin embargo la carencia de rigurosidad en la ejecución, metodologías coherentes para el diseño de modelos de simulación así como estándares mínimos en el entorno de la simulación en logística y gestión de la CS, son algunos de los retos que deben ser superados para materializar la investigación por medio de simulación (Manuj, Mentzer, & Bowers, 2009).

El modelado y simulación de sistemas complejos tradicionalmente ha estado ubicado en una o en la combinación de tres enfoques tradicionales: dinámica de sistemas, eventos discretos y el enfoque basado en agentes (BA) (Borshchev & Filippov, 2004). El interés en el modelado BA es cada



vez mayor (Macal & North, 2010), (Hilletofth & Lättilä, 2012), (Hilletofth & Lättilä, 2012). La simulación y el modelado BA es una técnica distribuida en la que el agente es la entidad básica de abstracción y se enfoca en la potencial cooperación que puede existir entre los agentes del sistema (Woolridge, 2009), extendiendo las capacidades de otras técnicas con propósitos normativos y descriptivos (Labarthe, Espinasse, Ferrarini, & Montreuil, 2007).

La implementación del modelado BA está fuertemente asociada al concepto de descentralización en la CS, (Whang, 1995) por ejemplo sostiene que en un ambiente descentralizado, en el que no existe cooperación entre las organizaciones de la CS, el sistema está regido por la teoría de agentes en la que es necesario crear incentivos (mecanismos) para que algunas organizaciones (agentes) que actúan en beneficio propio, actúen en beneficios de otros (CS) (Jensen & Meckling, 1976), estos principios hacen parte de los fundamentos en los que se edifica el modelado BA (Woolridge, 2009), evidentemente este tipo de comportamiento es común en CS reales y la coordinación bajo estas condiciones en la literatura actual no ha sido completamente desarrollada (Adarme Jaimes, Arango Serna, & Balcázar, 2011).

## ¿Por qué Modelado y Simulación basada en Agentes?

Actualmente las contribuciones investigativas asociadas al modelado y simulación BA se han esforzado en determinar por qué esta técnica puede ser una solución significativa para el análisis de CS descentralizadas, por ejemplo (Borshchev & Filippov, 2004) explica que el modelado BA

es en esencia descentralizado, debido a que el comportamiento global del sistema nunca se define, por el contrario el modelo define comportamientos individuales permitiendo que el comportamiento del sistema global emerja desde los individuos, lo que se conoce como micro-simulación (Arango Serna, Serna Uran, & Alvarez Uribe, 2012).

En la discusión acerca de la implementación del modelado y simulación BA (Müller, 1997) propone tres criterios para que esta técnica sea aplicable en un sistema: (i) el sistema a modelar debe mostrar una tendencia natural a que sus componentes estén distribuidos o dispersos; (ii) las interacciones entre sus componentes deben ser flexibles y (iii) debe pertenecer a un entorno dinámico. Más adelante (Schuldt, 2011) demuestra que el dominio de la logística y la CS, los criterios de (Müller, 1997) son satisfechos ya que en una CS los actores se encuentran dispersos a lo largo de zonas geográficas además de que el enfoque descentralizado parte de asumir que el control de la cadena está distribuido entre sus componentes, (Schuldt, 2011) argumenta que los otros dos criterios provienen del ambiente de incertidumbre presente en la logística y la CS, ya que es imposible determinar la naturaleza de las relaciones entre los actores así como los flujos en si quiera un mediano plazo.

Como se puede observar a pesar que la teoría alrededor del modelado y simulación BA viene siendo objeto de estudio por varios años, su aplicación en el contexto de la CS es un tema novedoso, al respecto (Ketter, Collins, & Gini, 2010) considera que la diversidad de enfoques en el diseño de agentes para la CS indica el estado de novedad del tópico y la necesidad de investigar para entender el diseño de agentes en la CS.

# METODOLOGÍA PARA EL MODELADO BASADO EN AGENTES DE CS

Diversas metodologías para el modelado BA han sido propuestas, sin embargo pocas se sitúan en el contexto de la CS (Hernández, Alemany, Lario, & Poler, 2009) algunas de las metodologías aplicadas a la CS aparecen en la revisión elaborada por (Labarthe, Espinasse, Ferrarini, & Montreuil, 2007). En este artículo utilizando como soporte algunas de las más importantes metodologías para el modelado de CS BA disponibles se realiza una propuesta metodológica para el modelado de CS enfatizando en los aspectos a considerar en ambientes con pequeñas empresas, finalmente la metodología propuesta se desarrolla por medio de un caso de estudio en una CS panificadora localizada en Palmira, Colombia.

Para el desarrollo de la propuesta se tuvieron en cuenta principalmente los aportes de tres artículos previos, esta propuesta busca realizar un aporte circunscrito al dominio de la gestión de la CS y la logística. Bajo esa consideración a continuación se exponen los aspectos principales de las metodologías consideradas.

En primer lugar (Labarthe, Espinasse, Ferrarini, & Montreuil, 2007) proponen una metodología BA aplicada al caso de una CS de la industria de clubes de golf junto con el análisis experimental por medio de simulación, los autores proponen una metodología compuesta por tres niveles (i) un nivel conceptual, en el que la CS real se modela por medio de un modelo de dominios, para luego ser reformulada hacia el paradigma de agentes obteniendo como resultado un modelo conceptual, (ii) un nivel operacional

en el que se desarrolla un modelo computacional conocido como modelo operacional, (iii) un nivel de explotación, en el que la simulación se lleva a cabo fundamentada en escenarios.

Otro caso particular se presenta por medio de la implementación en un caso de estudio en una CS de automóviles (Hernández, Alemany, Lario, & Poler, 2009) propone una metodología de nueve fases que considera la tecnología BA y la programación lineal para soportar la planeación operativa en CS las nueve frases se desarrollan a través de tres bloques de acción que guardan similitud con los propuestos por (Labarthe, Espinasse, Ferrarini, & Montreuil, 2007): (i) conceptualización y obtención de parámetros, (ii) modelado BA: identificación de los agentes y representación de los comportamientos y el modelo conceptual BA, (iii) la aplicación considera el desarrollo del aplicativo y la validación final.

Por último, (Ivanov, Sokolov, & Kaeschel, 2010) combinan la aplicación de la teoría de control, investigación de operaciones y el modelado BA en una metodología para conseguir CS adaptativa. Los autores también presentan una metodología basada en tres fases: modelado conceptual, modelado matemático y validación en ambiente de simulación.

En este artículo tomando como punto de partida las contribuciones expuestas en los párrafos anteriores se propone un método enfocado en el modelado basado en agentes para representar cadenas de suministro, lo cual permite experimentar mediante escenarios, situaciones como: mecanismos de coordinación, políticas de aprovisionamiento e inexistencia de mecanismos de coordinación lo cual puede llevar a comportamientos emergentes de equilibrio entre los diferentes agentes que componen la cadena de suministro. El alcance que se espera cubrir corresponde a la primera fase o nivel de los tres anteriores enfoques mencionados, es decir el

modelado conceptual. El objetivo del método desarrollado es convertirse en un lineamiento metodológico pivote que guíe las actividades de investigación en CS con una perspectiva BA.

La metodología propuesta consta de tres etapas: (i) descripción de la CS, (ii) definición del problema, (iii) formulación del modelo conceptual y validación, las cuales guardan significativa correlación con los propuestos en el primer bloque de acción de (Hernández, Alemany, Lario, & Poler, 2009).

## Descripción de la Cadena de Suministro

La primera etapa tiene un carácter exploratorio, en esta etapa el investigador necesita recopilar información sobre la CS a un nivel macro, lo que permite tener una visión holística del sistema. En este orden (Hernández, Alemany, Lario, & Poler, 2009), propone realizar la descripción de la CS por medio de cinco vistas diferentes, en esta metodología se tendrán en cuenta tan sólo tres vistas que adaptan las estructuras propuestas por (Ivanov, Sokolov, & Kaeschel, 2010), diferentes teorías y la experiencia práctica de los autores.

Las decisiones en materia logísticas de la CS están determinadas por los comportamientos, normas, políticas y la estructura general de la cadena (vista normativa), restringidas por los recursos físicos disponibles en los agentes de la CS (vista de infraestructura) y con el objetivo de proporcionar una función logística: almacenar, transportar, recolectar o manipular (Jünemann, 1989) disminuyendo los costos y aumentando los parámetros de servicio por medio de la administración de tres flujos (físico, información y financiero) (vista logística). Las tres vistas propuestas se muestran en la Ilustración 2.

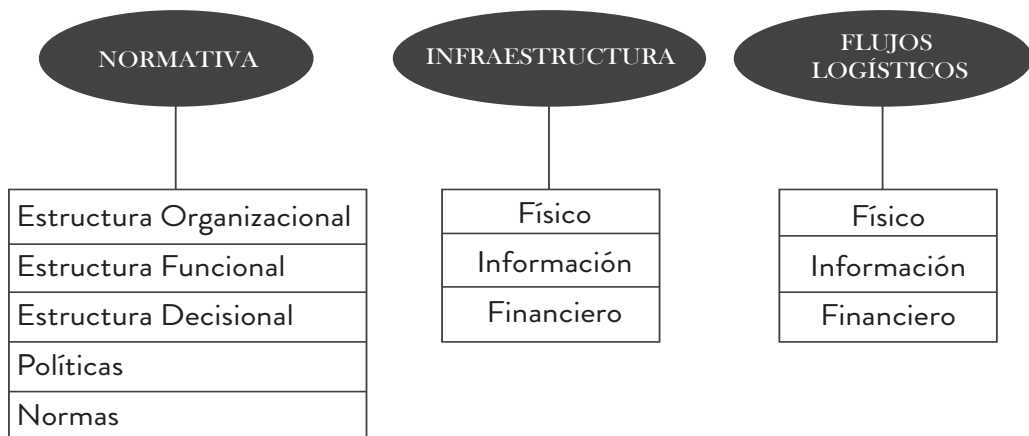


Ilustración 2. Vistas propuestas

## Vista Normativa o estructural

Esta vista busca describir el modelo de operación de la CS en un nivel agregado, se desarrolla mediante la descripción de las diferentes estructuras que rigen el modelo de operación.

Estructura Organizacional: Esta estructura busca identificar las entidades que hacen parte de la CS, se divide en (i) los actores: individuos u organizaciones que se organizan para proveer un bien o servicio, (ii) las dimensiones estructurales de las cuales hacen parte: la dimensión vertical que corresponde al número de niveles que existen desde que los insumos se extraen hasta el consumo final, y la dimensión horizontal que se refiere al número de nodos por cada nivel y (iii) la naturaleza entre las interacciones entre los agentes de la cadena como lo ilustra (Hernández, Alemany, Lario, & Poler, 2009) además clasificar las interacciones posibles como comunicación, coordinación, colaboración o competencia.



Estructura funcional: En esta estructura las funciones de los actores que hacen parte de la CS se describen, acá se considera relevante considerar el modelo SCOR (Supply-Chain Council (SCC), 1999), en el que desde una perspectiva de funciones logísticas los diferentes procesos de cada actor son categorizados en cinco procesos delimitados: planificar, aprovisionamiento, manufactura, distribución y devolución (Calderón Lama & Lario Esteban, 2005).

Estructura decisional: De igual forma que fue descrito por (Hernández, Alemany, Lario, & Poler, 2009) aquí el enfoque principal es identificar los posibles niveles en los que se toman decisiones (estratégico, táctico y operativo) así como los encargados del procesos de toma de decisiones en cada nivel.

Políticas generales: Acá se establecen las posibles metas de la CS como un todo, los criterios de servicio y el común del comportamiento gerencial a lo largo de la cadena. También se documentan los aspectos culturales prevaecientes en la operación de la CS.

Normas aplicables: El objetivo de este aspecto es el de tener en consideración el marco legal que regula la operación de la CS bajo estudio. Este aspecto es de importancia al considerar las restricciones existentes y para delimitar el dominio de la CS.

## Vista de Infraestructura

En esta vista los componentes físicos que permiten el desarrollo de las funciones logísticas en la CS son considerados, Esta información es útil para entender el entorno en el que se envuelven las operaciones de la CS. La infraestructura sirve como la instalación sobre la cual se dan los diferentes

flujos, razón por la que es coherente clasificarlos del mismo modo (física, información y financiera).

**Infraestructura física:** Es la relacionada con la localización geográfica de las instalaciones empresariales, los medios utilizados para llevar a cabo las funciones logísticas (carreteras, vehículos, empaques, herramientas, etc.).

**Infraestructura de información:** Acá se describe los canales de transmisión y almacenamiento de la información así como los medios, mecanismos y métodos que soportan los canales de transmisión. Redundancia (costos, disponibilidad, compatibilidad nodal).

**Infraestructura financiera:** Finalmente los medios de pago son descritos (efectivo, crédito, pago bancario, entre otros).

## Vista de Flujos Logísticos

En esta vista se conectan los diferentes nodos identificados en la vista anterior. La meta principal de esta vista es proporcionar y detallar la secuencia que se recorre para entregar los productos terminados al cliente final, identificando las relaciones que ocurren entre los agentes de la cadena.

**Flujo Físico:** Este flujo considera las materias primas, insumos, productos intermedios y terminados.

**Flujo de Información:** La comunicación que ocurre entre los agentes.

**Flujo Financiero:** El dinero u otros activos financieros que son intercambiados en la CS este flujo en muchos casos puede ser considerado como flujo de información, excepto cuando las transacciones se realizan usando commodities en cuyo caso se asemeja más a un flujo físico.

## Definición del problema

En la segunda fase metodológica se define el problema y se limitan los alcances del modelado, la primera fase es el insumo principal para la fase actual sin embargo es necesario adquirir información específica a un nivel micro, en esta fase también las variables cuantitativas son más relevantes debido a la necesidad de poseer variables medibles. La siguiente fase se describe a continuación:

Definición de alcance: Los componentes específicos de la cadena que serán abordados deben delimitarse, con respecto al caso particular (Hernández, Alemany, Lario, & Poler, 2009) una alternativa es desarrollar de nuevo cada una de las vistas de la etapa anterior, esta vez especificando elementos importantes para el estudio, según los objetivos de la simulación. En este paso también se definirá en nivel decisional objetivo del modelo.

Estructura decisional: Para cada  $i$  ( $i= 1, 2, 3... n$ ) tomador de decisión identificado en el paso anterior, la estructura de decisiones debe ser descrita considerando los siguientes elementos de la decisión.

- La decisión logística  $j$  ( $j= 1, 2, 3... m$ ) que debe ser tomada por el  $i$ -ésimo tomador de decisiones.
- Los flujos en los cuales actuará la decisión que se tome.
- Los objetivos que son tenidos en cuenta por el tomador de decisiones extraído de la vista normativa.
- Las normas y leyes aplicables a la decisión.
- Los recursos involucrados extraídos de la vista de infraestructura.
- La información disponible para el proceso de toma de decisión.
- Las interdependencias con otros tomadores de decisiones y el grado de autonomía con el que se toma.

- El proceso con el que la decisión es soportada es un proceso racional como un modelo de optimización o proviene de la experiencia adquirida y se toma de forma sistemática.

Definición de los agentes: La estructura principal se deriva de la definición formal de los agentes que estarán involucrados en el alcance del problema; para esto (Hernández, Alemany, Lario, & Poler, 2009) definieron tres tipos de agentes, (i) agentes principales, (ii) agentes globales, (iii) agentes intermedios.

**Agentes Principales:** Estos agentes representan los diferentes tomadores de decisiones presentes en la CS.

**Agentes Globales:** Este agente es generado producto de la necesidad de contar con un agente que se encargue del desempeño global del sistema.

**Agentes Intermedios:** Estos agentes se encargan de mediar en busca de condiciones específicas cuando existe negociación entre los agentes.

## Formulación y Validación del Modelo Conceptual

Esta etapa busca que por medio de una semántica y el uso de diagramas estandarizados se elabore una descripción de los aspectos que deberá contener la implementación en software. Existe un amplio conjunto de metodologías BA (TROPOS, UML, GAIA, PROMETHEUS) la descripción debe de ser clara y fiel a la información obtenida.

Una vez el modelo conceptual es diseñado es necesario validar el grado de precisión de la representación con respecto a la realidad para ello se deben

considerar consultas a expertos y actores de la CS, con esta validación se espera reducir posibles sesgos y ajustar la información obtenida. De tener en cuenta que la metodología general y cada una de sus etapas consiste en un proceso iterativo. Posterior a la validación del modelo conceptual se realiza la simulación a nivel de software, incluyendo el ajuste del simulador, el planteamiento de escenarios, la definición de número de corridas del simulador y el tratamiento y análisis de los datos de salida.

## Descripción de la Cadena de Suministro

El caso de estudio tiene como objetivo mostrar una implementación de la metodología propuesta, este corresponde a la CS del sector panificador localizada en el municipio de Palmira- Valle, Colombia. El municipio cuenta con una población de 300,000 habitantes aproximadamente, la industria panificadora se considera estratégica para el desarrollo dada la existencia de diversas actividades agrícolas de gran escala relacionadas con la industria del pan. De anotar que una de las plantas molinera más grande del país se encuentra en las inmediaciones del municipio, así como la industria del azúcar de caña. Por otro lado, dentro del municipio existen distribuidores especializados de insumos para el sector panificador conocidos como “queseras” e incluso hay panaderías locales que se han logrado consolidar y atender mercados internacionales (Adarme, 2007).

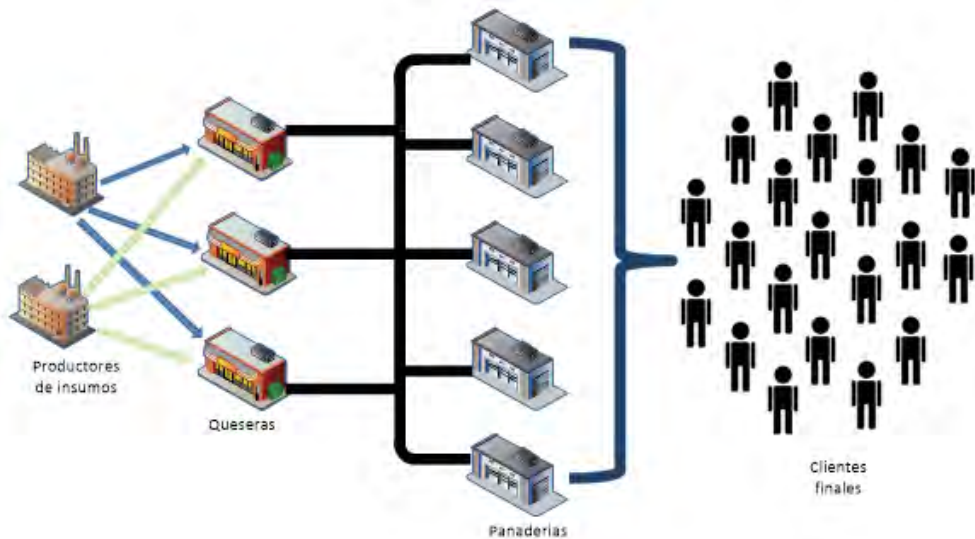


Ilustración 3. Cadena de suministro ejemplo

En el nivel macro la cadena puede ser considerada como una cadena de por lo menos tres niveles, proveedores, distribuidores y panaderías. Ilustración 3. La CS tiene un modelo descentralizado, además no se observa integración vertical, la tendencia en la toma de decisiones está motivada por el aprendizaje empírico en casi toda la CS.

Los agentes de la cadena persiguen el objetivo de optimizar sus beneficios económicos mientras proveen productos terminados (pan y similares) a consumidores finales localizados en el municipio principalmente.

## Vista Normativa o estructural

Estructura Organizacional: Los resultados de la investigación permitieron identificar a 14 diferentes empresas de insumos, de los cuales el 21% corresponden al nivel de proveedores (compañías de manufactura que realizan la distribución directa a las panaderías), el 79% restante al nivel de



distribuidores. Las relaciones identificadas entre los niveles verticales de la cadena se limitan a simple comunicación entre las organizaciones, sin existir iniciativa de coordinación o colaboración. Por otro lado, las relaciones a nivel horizontal se limitan a competencia, en el estudio no se evidencian iniciativas de colaboración o coordinación entre compañías.

Estructura funcional: De acuerdo a las funciones descritas por el modelo de referencia SCOR las distribuidoras hacen parte de las funciones de: planeación, aprovisionamiento, distribución y devolución. Otra consideración importante es que tan sólo el 9% de las panaderías realiza procesos de distribución, el 91% restante el cliente final compra en las instalaciones de la panadería.

Estructura decisional: Al considerar las decisiones logísticas operativas que se llevan a cabo se identificaron cuatro elementos de decisión, dos en las empresas distribuidoras: (i) el tamaño de lotes de aprovisionamiento, (ii) el tamaño de lotes y la programación de rutas de distribución, de igual forma dos elementos de decisión en las panaderías: (i) el tamaño de lote de aprovisionamiento y (ii) el tamaño de lote de producción, las decisiones de distribución en las panaderías a pesar de existir, no se consideraron.

Políticas generales: En el estudio se identificó también que a lo largo de la cadena la selección de los proveedores es orientada principalmente por el precio, en segundo lugar aparecen la calidad de los insumos y los tiempos de entrega, factores que dan indicios sobre los aspectos que determinan el desempeño del sistema.

Normas aplicables: el control sobre el nivel de calidad del producto final recae sobre el ente regulador encargado de vigilar el cumplimiento de las políticas relacionadas con la salud y la alimentación, las cuales a su vez están basadas en las buenas prácticas de manufactura (Decreto 3075).

## Vista de Infraestructura

La infraestructura disponible para el desarrollo de las funciones logísticas hace parte de infraestructura multi-propósito que se comparte con otras actividades urbanas, la vista física está compuesta principalmente de instalaciones dispersas en el municipio, con una marcada tendencia a la concentración alrededor de la plaza principal, desde la cual se irradia el desarrollo económico. Las infraestructuras de información y financieras son tradicionales y los flujos se desarrollan a través de comunicación personal y telefónica entre los agentes.

## Vista de Flujos Logísticos

El flujo físico es principalmente unidireccional partiendo de los eslabones superiores hacia el cliente final. Los flujos de la CS convergen en el eslabón de los distribuidores con diferentes procedencias y una vez allí son almacenados y distribuidos en diferentes panaderías por medio de pequeños vehículos de transporte como camiones pequeños, motos o bicicletas. El flujo de información no es intenso y se limita por lo general a la información bidireccional del contrato comercial entre las organizaciones. Finalmente, el flujo financiero que se produce en compensación por el servicio prestado. Los diferentes flujos y sus direcciones se describen en la Ilustración. 4.

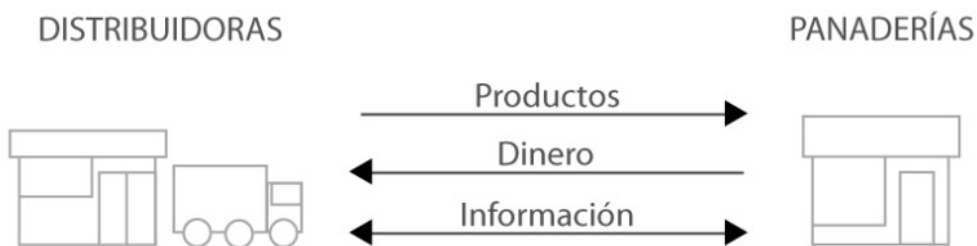


Ilustración 4. Dirección de los flujos en la cadena ejemplo

#### Definición del Problema

A continuación, se desarrolla la definición del problema, para generar el modelo conceptual de la CS estudiada para su posterior implementación a nivel de software.

#### Definición del Alcance

El alcance del modelo conceptual propuesto será: representar la operación actual de la relación logística entre los distribuidores de materia prima y las pequeñas industrias panificadoras a un nivel operacional, esta representación se realiza con el ánimo de establecer indicadores del desempeño actual del sistema y permitir una posterior evaluación de diferentes mecanismos de coordinación y alternativas en la toma de decisiones de las panaderías, por ejemplo, en los niveles de inventario. Para este propósito se llevó a cabo una investigación por medio de fuentes primarias en 5 de los distribuidores y 80 panaderías. El número total de panaderías en Palmira Valle es de 204 de acuerdo con la información disponible (registros presentes en la Cámara de Comercio).

Para llevar a cabo el estudio y caracterizar los flujos físicos se seleccionó un conjunto de insumos usados en la elaboración del pan y productos afines, la selección de los productos se realizó con base a estudios previos y a observaciones propias de la investigación. Los insumos seleccionados fueron: Harina, Levadura, Azúcar, Mantequilla, Queso, Almidón, Harina Integral, Hojaldre y Colmaíz (preparado de ingredientes sólidos para elaboración de productos de panadería).

Una de las características principales en la operación logística corresponde a un aprovisionamiento de insumos de distintos orígenes en el nodo del distribuidor, en donde son almacenados, consolidados y distribuidos a las panaderías. La frecuencia de los flujos entre distribuidores y panaderías ocurren con distintas frecuencias: diariamente (13%), semanalmente (66%), quincenalmente (14%) y mensualmente (7%), así mismo el 50% de las panaderías revelo que debe realizar pedidos adicionales causados por demandas mayores a los estimados.

Finalmente es conveniente agregar que el flujo de información se desarrolla por vía telefónica en un (89%) de las veces y directamente mediante visita un (39%), el uso de correo electrónico u otras tecnologías es nulo. En la totalidad de las panaderías la transacción personal es el método utilizado para transferir el dinero. Tan sólo el 4% de las panaderías comparte información sobre los niveles de consumo de los insumos, y las relaciones de información son limitadas. Finalmente, el flujo financiero se presenta al momento de recibir insumos, a pesar que el 50% de los distribuidores ofrece opciones de crédito, los pedidos se realizan considerando el dinero en caja.

# Estructura decisional

En esta parte se desarrolla una descripción detallada de las estructuras decisionales presentes en los tomadores de decisiones identificados en el paso anterior. En la Ilustración 5 se muestra el diagrama formulado para cada agente identificado en la cadena, el desarrollo de este diagrama permite continuar de manera correcta con la implementación.

Definición de los agentes: En la cadena se identifican cuatro agentes principales coherentes con las decisiones identificadas anteriormente: (i) compras en las distribuidoras, (ii) distribución en las distribuidoras, (iii) compras en las panaderías, (iv) producción en las panaderías.



Ilustración 5. Modelo conceptual por actor

# Formulación y validación del modelo conceptual

El modelo conceptual fue formulado por medio de la metodología de TROPOS (Rebollar, 2008), de manera que la implementación informática posterior pueda hacerse con base a una representación precisa y estandarizada. La validación del modelo propuesto se llevó a cabo por medio de la consulta a expertos del sector, dueños de las panaderías y dueños de las distribuidoras, por medio de la validación el modelo fue ajustado.

## Simulación a nivel de software

A continuación, se muestran los resultados de la simulación basada en agentes realizada para representar la cadena de suministro del subsector panificador de Palmira Valle. Se plantea un experimento considerando las decisiones de los niveles de inventario que realizan las panaderías. Por un lado, simulando el comportamiento de inventario de acuerdo a las políticas observadas en las panaderías, y una segunda corrida del simulador ajustando los niveles de inventario de acuerdo al método Silver-Meal recomendado cuando se presentan demandas estocásticas.

En primer lugar, es recomendable mencionar que el método Silver-Meal fue desarrollado por A. Silver en 1973, dicho método ha probado tener Buena respuesta bajo demandas estocásticas, el objetivo del método es reducir el costo de ordenar y mantener inventarios (Silver, 1998).

Se planteó un experimento para comparar el comportamiento del simulador con datos de entrada de la línea base producto de la caracterización



de las pequeñas empresas, con el comportamiento en el caso de adoptar el método Silver-Meal para realizar los pedidos de materia prima. Por otro lado, se muestra la diferencia en los inventarios al comparar el escenario uno usando el método empírico de las pequeñas empresas, con los datos arrojados al utilizar el método Silver-Meal.

Resultados de inventarios línea base (simulación)

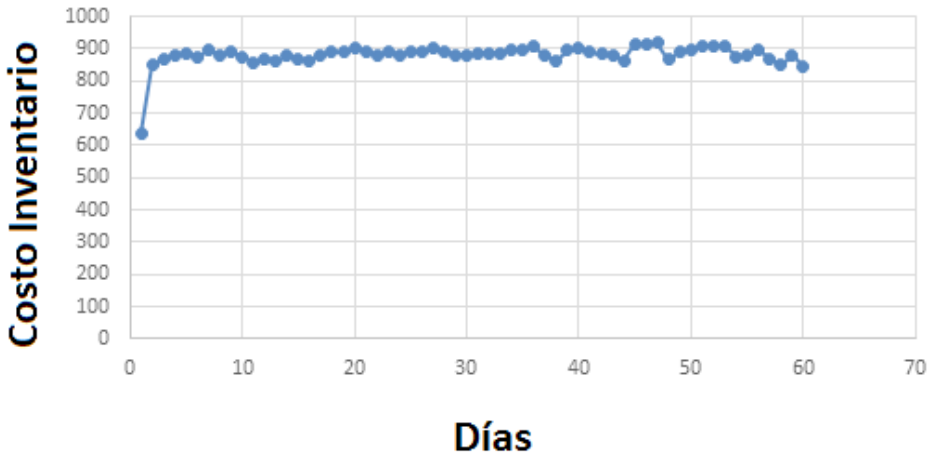


Ilustración 6. Resultados línea base

Resultados de inventarios usando el método Silver-Meal

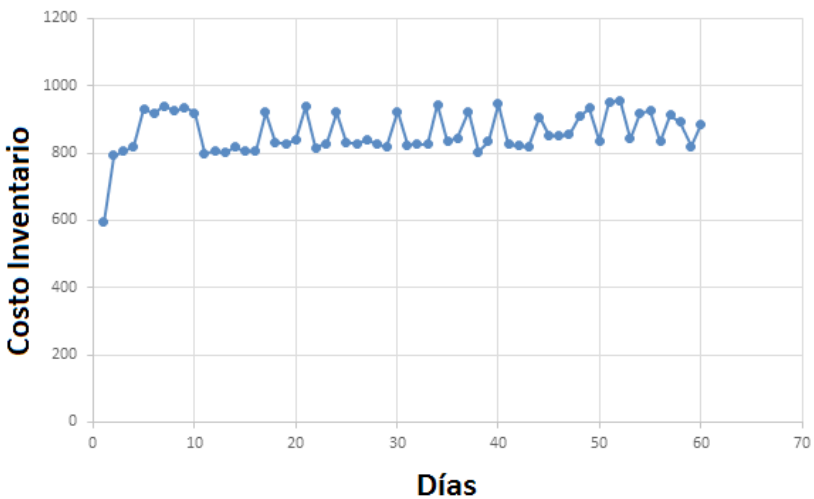


Ilustración 7. Resultados usando método Silver-Meal

## Comparación Costo de inventarios

Se observa una mejora al usar el método Silver-Meal, no obstante, debido a que el comportamiento de la demanda no es tan variable en el tiempo, la mejora no es considerable, lo anterior teniendo en cuenta el análisis de los datos arrojados en el proceso de simulación. Por otro lado, se observa un aumento en la variabilidad del inventario al usar el método Silver-Meal, de anotar que se usó un  $n$  igual a tres, lo que quiere decir que en la simulación se proyectaron inventarios calculados a partir del método Silver-Meal para tres periodos.

Método Silver-Meal (Simulado por 60 días)	Método usando línea base (Simulado por 60 días)
51.552 Unidades Monetarias	52.817 Unidades Monetarias

## CONCLUSIONES Y DIRECCIONES PARA FUTURAS INVESTIGACIONES

En este artículo se desarrolló una propuesta metodológica basada en contribuciones recientes con miras a contribuir en futuras aproximaciones al modelado de cadenas de suministro usando modelado y simulación basada en agentes.

Se realizó la construcción del simulador a nivel de software y se compararon los resultados con respecto a políticas de inventario, con lo cual

se valida la usabilidad de la metodología para desarrollar simulaciones con miras a experimentar situaciones particulares que se presentan en la cadena de suministro real, contrastadas con situaciones hipotéticas al utilizar métodos técnicos para tomar decisiones a nivel operativo.

Por otro lado se pueden plantear modelos que integren los diferentes paradigmas de simulación, como lo son la dinámica de sistemas y la simulación por eventos discretos, además de que se cuenta con la flexibilidad del modelado basado en agentes como base para desarrollar modelos de sistemas logísticos. El potencial de los sistemas multiagentes permite incluir temas como teoría de control, optimización convexa, optimización usando algoritmos bioinspirada entre otros.

Finalmente este trabajo debe ser ampliado por medio de la implementación por medio de software y su posterior análisis, estas fases han sido consideradas en detalle por medio de otras contribuciones, la aplicación del método como herramienta para el diseño y prueba de mecanismos de coordinación queda libre para posteriores investigaciones.

## BIBLIOGRAFÍA

- Adarme Jaimes, W., Arango Serna, M. D., & Balcázar, D. A. (2011). A coordination agents' model for the colombian shipbuilding industry's logistic system. *Ingeniería e Investigación*, 31(2), 102-111.
- Adarme, W. Á. (2007). Consumo de insumos agroindustriales por el subsector panificador de Palmira, Valle del Cauca. *Acta agronómica* Vol. 56, 93-102.
- Arango Serna, M. D., Serna Uran, C. A., & Alvarez Uribe, K. C. (2012). Collaborative Autonomous Systems in Models of Urban Logistics. *Dyna*, 79(172), 171-179.

- Arshinder, A. K. (2008). Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions. *International Journal of Production Economics*, 316-335.
- Arshinder, K. K. (2011). A review on supply chain coordination: Coordination mechanisms, managing uncertainty and research directions. En T. M. Choi, *Supply Chain Coordination Under Uncertainty* (págs. 39-82). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Banerjee, A. (1986). A joint economic-lot-size model for purchaser and vendor. *Decision Sciences*, 17, 292-311.
- Banerjee, A., Kim, S.-L., & Burton, J. (2007). Supply chain coordination through effective multi-stage inventory linkages in a JIT environment. *Int. J. Production Economics*, 108, 271-280.
- Borshchev, A., & Filippov, A. (2004). *From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools*. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society. Oxford, England.
- Cachon, G. P. (1999). Competitive supply chain inventory management. En R. G. S. Tayur, *Quantitative Models for Supply Chain Management* (págs. 111-145). Boston: Kluwer.
- Calderón Lama, J. L., & Lario Esteban, F. C. (2005). Análisis del modelo SCOR para la Gestión de la Cadena de Suministro. IX Congreso de Ingeniería de Organización, (págs. 1-10). Gijón.
- Cristopher, M. (1998). *Logistics and Supply Chain Management—Strategies for Reducing Cost and Improving Service* (2nd ed. ed.). London: Prentice Hall.
- Darwish, M. A., & Odah, O. M. (2010). Vendor managed inventory model for single-vendor multi-retailer supply chains. *European Journal of Operational Research*(204), 473-484.
- Davis-Sramek, B., & Fugate, B. (2007). State of logistics: a visionary perspective. *Journal of Business Logistics*, 28(2), 1-34.
- de Souza, R., Zice, S., & Chaoyang, L. (2000). Supply chain dynamics and optimization. *Integrated Manufacturing Systems*, 11(5), 348-364.
- Forrester, J. W. (1958). Industrial Dynamics. *Harvard Business Review*, 37-66.

- Fugate, B., Sahin, F., & Mentzer, J. T. (2006). Supply Chain Management Coordination Mechanisms. *Journal of Business Logistics*, 27(2), 129-161.
- Giannocaro, I., & Pontrandolfo, P. (2004). Supply chain coordination by revenue sharing contracts. *Int. J. Production Economics*(89), 131-139.
- Größler, A., & Schieritz, N. (2005). Of Stocks, Flows, Agents and Rules – ”Strategic” Simulations in Supply Chain Research. En H. Kotzab, H. Seuring, M. Müller, & G. Reiner, *Research Methodologies in Supply Chain Management* (págs. 445-460). Heidelberg: Springer.
- Hernández, J. E., Alemany, M., Lario, F. C., & Poler, R. (2009). SCAMM-CPA: A supply chain agent-based modelling methodology that supports a collaborative planning process. *Innovar*, 19(34), 99-120.
- Hilletoft, P., & Lättilä, L. (2012). Agent based decision support in the supply chain context. *Industrial Management & Data Systems*, 112(8), 1217-1235.
- Ivanov, D., Sokolov, B., & Kaeschel, J. A. (2010). Multi-structural framework for adaptive supply chain planning and operations control with structure dynamics considerations. *European Journal of Operational Research*, 200, 409-420.
- Jensen, M., & Meckling, W. (1976). Theory of firm: Managerial behavior, agency cost, and capital structure. *Journal of Financial Economics*, 3, 305-360.
- Jünemann, R. (1989). *Materialfluss und Logistik: Systemstechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen*. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag.
- Ketter, W., Collins, J., & Gini, M. (2010). *Coordinating Decisions in a Supply-Chain Trading Agent. Agent-Mediated Electronic Commerce X and Trading Agent Design and Analysis VI*. Berlin: Springer.
- Labarthe, O., Espinasse, B., Ferrarini, A., & Montreuil, B. (2007). Toward a methodological framework for agent-based modelling and simulation of supply chains in a mass customization context. *Simulation Modelling Practice and Theory*(15), 113-116.
- Lambert, D. M. (2004). *Supply Chain Management: Process, Partnerships, Performance*. Sarasota, FL: Supply Chain Management Institute.

- Lee, H. L., & Billington, C. (1993). Material management in decentralized supply chains. *Operations Research*, 41(5), 835-847.
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. *Management Science*, 43(4), 546-558.
- Lee, Y. H., Cho, M. K., & Kim, Y. B. (2002). Supply Chain Simulation with discrete-continuous combined modelling. *Computers & Industrial Engineering*, 43, 375-392.
- Li, X., & Wang, Q. (2007). Coordination mechanisms of supply chain systems. *European Journal of Operational Research*, 179(1), 1-16.
- Macal, C. M., & North, M. J. (2010). Tutorial on agent-based modelling and simulation. *Journal of Simulation*, 4, 151-162.
- Malone, T. W., & Crowston, K. (1994). The Interdisciplinary Study of Coordination. *ACM Computing Surveys*, 26(1), 87-119.
- Manuj, I., Mentzer, J. T., & Bowers, M. R. (2009). Improving the rigor of discrete-event simulation in logistics and supply chain research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39(3), 172-201.
- Maw-Sheng Chern, Y.-L. C.-T. (2014). Nash equilibrium solution in a vendor-buyer supply chain model with permissible delay in payments. *Computers & Industrial Engineering*, 116-123.
- Mingming Leng, M. (2009). Lead-time reduction in a two-level supply chain: Non-cooperative equilibria vs. coordination with a profit-sharing contract. *Int. J. Production Economics*, 521-544.
- Monahan, J. P. (1984). A quantity discount pricing model to increase vendor profits. *Management Science*, 30(6), 720-726.
- Müller, H. J. (1997). Towards Agent Systems Engineering. *Data & Knowledge Engineering*, 23(3), 217-245.
- Rebollar, A. ,. (2008). UNA GUÍA RÁPIDA DE LA METODOLOGÍA TROPOS. REVISTA GTI.
- Russel Stuart, N. P. (2010). *Artificial Intelligence A Modern Approach* . USA: Pearson.
- Sahin, F., & Robinson, E. P. (2002). Flow Coordination and Information Sharing in Supply Chains: Review, Implications, and Directions for

- Future Research. *Decision Sciences*(33), 505-536.
- Schuldt, A. (2011). *Multiagent Coordination Enabling Autonomous Logistics*. Bremen: Springer.
- Silver, E. P. (1998). *Inventory Management and Production Planning and Scheduling*. Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Sprengler, J. J. (1950). Vertical Integration and Antitrust Policy. *Journal of Political Economy*, 347-352.
- Stadler, H. (2000). Supply chain management—an overview. En C. K. H. Stadler, *Supply Chain Management and Advanced Planning. Concepts, Models, Software and Case Studies* (págs. 7-29). Berlin: Springer.
- Sucky, E. (2006). A bargaining model with asymmetric information for a single supplier-single buyer problem. *European Journal of Operational Research*, 516-535.
- Supply-Chain Council (SCC). (1999). *Supply-Chain Operations Reference-model: Overview Version 3.0*. Obtenido de <http://www.supply-chain.org>
- Tokar, T. (2010). Behavioural research in logistics and supply chain management. *The International Journal of Logistics Management*, 21(1), 89-103.
- Whang, S. (1995). Coordination in Operations: A Taxonomy. *Journal of Operations Management*, 12, 413-422.
- Woolridge, M. (2009). *An Introduction to MultiAgent Systems* (2 ed.). West Sussex: John Wiley & Sons Ltd.
- Yao, Y. D. (2008). The inventory value of information sharing, continuous replenishment, and vendor-managed inventory. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 361-378.
- Yao, Y., Evers, P. T., & Dresner, M. E. (2007). Supply chain integration in vendor-managed inventory. *Decision Support Systems*, 663-674.
- Zhao, X., Zhao, X., & Wu, Y. (2013). Editorial - Opportunities for research in behavioral operations management. *International Journal of Production Economics*, 142, 1-2.



---

*Andrés Ignacio Zamudio Castro  
Francisco Javier Caballero Otalora  
Ramón Eduardo Guacaneme Pineda  
Mateo Pachón Rincón*