



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **Modelado de la gestión de la calidad en cadenas de suministro usando un enfoque multi-etapas**

## **Modeling Supply Chain Quality Management using a Multi-stage Approach**

**Juan Miguel Cogollo Flórez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización  
Medellín, Colombia  
2020



# **Modelado de la gestión de la calidad en cadenas de suministro usando un enfoque multi-etapas**

**Juan Miguel Cogollo Flórez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

**Doctor en Ingeniería – Industria y Organizaciones**

Director:

Ph.D. Alexander Alberto Correa Espinal

Línea de Investigación:

Gestión de la Cadena de Suministro

Grupo de Investigación:

Modelamiento para la Gestión de Operaciones - GIMGO

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización

Medellín, Colombia

2020





## **Agradecimientos**

A la vida, por todo lo que me ha dado.

A mis padres, abuela, hermanas, sobrinos, por su amor, respaldo y apoyo en todo momento.

A mi director, Alexander Correa Espinal, por su constante guía, apoyo y compromiso con mi proceso de formación. Eterna gratitud.

A la Universidad Nacional de Colombia y en especial al Departamento de Ingeniería de la Organización de la Facultad de Minas, Sede Medellín por brindarme la oportunidad de cualificarme a nivel posgradual en Maestría y Doctorado.



## Resumen

La investigación en el área de gestión de la calidad en cadenas de suministro evidencia falta de desarrollos enfocados en el análisis de estructuras relacionales para la toma de decisiones táctico-estratégicas. En esta tesis se propone un modelo analítico para la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro usando un enfoque multi-etapas. La metodología de modelado propuesta integra mapas cognitivos grises difusos multicapa para la configuración estructural y diseños factoriales fraccionados para validar el desempeño dinámico del modelo. Las variables que representan el desempeño global de la gestión de la calidad en cadenas de suministro están agrupadas en la capa principal. Las variables del desempeño en calidad en las tres etapas de la cadena de suministro están agrupadas en submapas en una segunda capa. La validación del modelo vía experimentos de simulación computacional permitió identificar los factores principales estadísticamente significativos en cada mapa y determinar la asignación de valores grises o concretos a los mismos. Finalmente, los aportes realizados en esta investigación constituyen un punto de partida para futuras aplicaciones en sectores específicos y la integración de otras técnicas cuantitativas.

**Palabras clave:** Gestión de la calidad en cadenas de suministro, modelado analítico multietapa, mapas cognitivos grises difusos, diseño factorial fraccionado.

## **Abstract**

Research in Supply Chain Quality Management lacks developments focused on the analysis of relational structures for tactical-strategic decision making. This doctoral thesis proposes an analytical model for Supply Chain Quality Management coordination and integration, by using a multi-stage approach. The proposed modeling methodology integrates Multi-layer Fuzzy Grey Cognitive Maps for the structural configuration and fractional factorial designs to validate the dynamic performance of the model. The variables that represent the overall performance of Supply Chain Quality Management are grouped in the main layer. The quality performance variables in the three stages of the supply chain are grouped into submaps in a second layer. The validation of the model via computational simulation experiments made it possible to identify statistically significant factors main in each map and to determine the assignment of gray or specific values to them. Finally, the contributions made in this research constitute a starting point for future applications in specific sectors and the integration of other quantitative techniques.

**Keywords: Supply Chain Quality Management, Multi-layer Analytical Modeling, Fuzzy Grey Cognitive Maps, Fractional Factorial Design.**

# Contenido

	Pág.
<b>1. La Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro.....</b>	<b>5</b>
1.1 Origen del concepto de Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro .....	6
1.2 Definiciones de Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro .....	8
1.3 Colaboración, coordinación e integración en la Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro.....	9
1.4 Antecedentes del modelado de la Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro.....	10
1.4.1 Formulación de pregunta de investigación.....	11
1.4.2 Definición de criterios de búsqueda .....	11
1.4.3 Definición de criterios de inclusión y exclusión .....	12
1.4.4 Selección y clasificación de estudios .....	12
1.4.5 Análisis bibliométrico de resultados .....	14
1.4.6 Análisis taxonómico de resultados.....	16
1.5 Conclusión .....	18
<b>2. Fundamentos metodológicos y desarrollos previos de la investigación.....</b>	<b>21</b>
2.1 Diseño metodológico de la investigación.....	21
2.2 Modelado con Mapas Cognitivos Difusos y Mapas Cognitivos Grises Difusos .	22
2.2.1 Modelado con Mapas Cognitivos Difusos .....	22
2.2.2 Modelado con Mapas Cognitivos Grises Difusos .....	25
2.3 Diseño factorial fraccionado $2^{k-p}$ .....	26
2.4 Desarrollos previos del proceso investigativo .....	28
2.4.1 Modelo difuso para la medición del desempeño de SCQM .....	28
2.4.2 Modelo de SCQM usando mapas cognitivos difusos .....	31
2.4.3 Modelo multi-etapa de SCQM usando mapas cognitivos difusos.....	33
2.5 Conclusión .....	36
<b>3. Modelo analítico multi-etapas de la gestión de calidad en cadenas de suministro.....</b>	<b>39</b>
3.1 Selección de variables del modelo .....	40
3.2 Determinación de relaciones causales .....	43
3.3 Construcción del modelo ML-FGCM-SCQM.....	45
3.4 Análisis de la estructura del modelo .....	45
3.5 Validación del desempeño del modelo .....	46
3.5.1 Objetivo del experimento de simulación.....	47
3.5.2 Clasificación y definición de variables y factores.....	47
3.5.3 Selección del diseño factorial fraccionado .....	48

3.5.4	Ejecución del experimento de simulación .....	49
3.5.5	Análisis de efectos .....	53
3.6	Conclusión .....	60
<b>4.</b>	<b>Discusión de resultados y publicaciones .....</b>	<b>62</b>
4.1	Discusión sobre el diseño metodológico .....	62
4.2	Discusión sobre el modelo y sus resultados.....	63
4.2.1	Resultados de la etapa de abastecimiento .....	63
4.2.2	Resultados de la etapa de fabricación .....	64
4.2.3	Resultados de la etapa de distribución .....	64
4.2.4	Resultados del mapa principal (desempeño de SCQM) .....	65
4.3	Publicaciones.....	66
4.3.1	Artículos publicados y sometidos .....	66
4.3.2	Ponencias y Memorias .....	66
4.3.3	Formación de recursos humanos .....	68
<b>5.</b>	<b>Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.....</b>	<b>69</b>
5.1	Conclusiones .....	69
5.2	Recomendaciones .....	71
5.3	Trabajos futuros .....	72
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>115</b>

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1-1.</b> Esquema conceptual de <i>Supply Chain Quality Management</i> .....	7
<b>Figura 1-2.</b> Etapas de la metodología de revisión de literatura. ....	11
<b>Figura 1-3.</b> Clasificación taxonómica del modelado analítico de la coordinación e integración de SCQM .....	13
<b>Figura 1-4.</b> Mapa bibliométrico de resultados. ....	15
<b>Figura 2-1.</b> Diseño metodológico de la investigación. ....	22
<b>Figura 2-2.</b> Ejemplo de la representación de un FCM con cinco conceptos.....	23
<b>Figura 2-3.</b> Ejemplo de un FGCM con cuatro conceptos.....	26
<b>Figura 2-4.</b> Sistemas de inferencia difusa para medición del desempeño sostenible de SCQM .....	30
<b>Figura 2-5.</b> Relaciones 3D entre los desempeños económico y ambiental y el índice sostenible de SCQM.....	31
<b>Figura 2-6.</b> Modelo de Mapa Cognitivo Difuso de SCQM (FCM-SCQM).....	32
<b>Figura 2-7.</b> Resultados del proceso de inferencia del modelo FCM- SCQM .....	33
<b>Figura 2-8.</b> Modelo multi-etapa de SCQM (ML-FCM-SCQM).....	35
<b>Figura 2-9.</b> Resultados del proceso de inferencia del modelo ML-FCM-SCQM. ....	36
<b>Figura 3-1.</b> Modelo de mapa cognitivo gris difuso multi-etapa de la gestión de la calidad en cadenas de suministro (ML-FGCM-SCQM). ....	45
<b>Figura 3-2.</b> Diagrama de Pareto estandarizado de los efectos para Desempeño en Abastecimiento.....	54
<b>Figura 3-3.</b> Gráfica de efectos principales para Desempeño en Abastecimiento.....	55
<b>Figura 3-4.</b> Diagrama de Pareto estandarizado de los efectos para Desempeño en Fabricación.....	56
<b>Figura 3-5.</b> Gráfica de efectos principales para Desempeño en Fabricación. ....	56
<b>Figura 3-6.</b> Diagrama de Pareto estandarizado de los efectos para Desempeño en Distribución. ....	57
<b>Figura 3-7.</b> Gráfica de efectos principales para Desempeño en Distribución. ....	57
<b>Figura 3-8.</b> Diagrama de Pareto estandarizado de los efectos para Desempeño en SCQM. ....	59
<b>Figura 3-9.</b> Gráfica de efectos principales para Desempeño en SCQM. ....	59

## Lista de Tablas

	Pág.
<b>Tabla 1-1.</b> Resultados de clasificación taxonómica de los artículos seleccionados.....	17
<b>Tabla 2-1.</b> Capas, mapas y variables del modelo SCQM.....	34
<b>Tabla 3-1.</b> Descripción de variables de la etapa de abastecimiento.....	41
<b>Tabla 3-2.</b> Descripción de variables de la etapa de fabricación. ....	41
<b>Tabla 3-3.</b> Descripción de variables de la etapa de distribución.....	42
<b>Tabla 3-4.</b> Descripción de variables de SCQM (mapa principal). ....	42
<b>Tabla 3-5.</b> Capas, etapas y variables del modelo. ....	43
<b>Tabla 3-6.</b> Interrelaciones de variables del FGCM 2 (etapa de abastecimiento). ....	43
<b>Tabla 3-7.</b> Interrelaciones de variables del FGCM 3 (etapa de fabricación). ....	44
<b>Tabla 3-8.</b> Interrelaciones de variables del FGCM 4 (etapa de distribución). ....	44
<b>Tabla 3-9.</b> Interrelaciones de variables del FGCM 1 (SCQM). ....	44
<b>Tabla 3-10.</b> Índices de densidad del modelo ML-FGCM-SCQM .....	46
<b>Tabla 3-11.</b> Factores y niveles del experimento en FGCM 2.....	47
<b>Tabla 3-12.</b> Factores y niveles del experimento en FGCM 3.....	47
<b>Tabla 3-13.</b> Factores y niveles del experimento en FGCM 4.....	48
<b>Tabla 3-14.</b> Factores y niveles del experimento en FGCM 1.....	48
<b>Tabla 3-15.</b> Tipos de diseño factorial fraccionado seleccionados. ....	48
<b>Tabla 3-16.</b> Resultados de simulación de etapa de abastecimiento para el diseño factorial fraccionado $2^{9-4}$ .....	49
<b>Tabla 3-17.</b> Resultados de simulación de etapa de fabricación para el diseño factorial fraccionado $2^{12-7}$ .....	50
<b>Tabla 3-18.</b> Resultados de simulación de etapa de distribución para el diseño factorial fraccionado $2^{8-2}$ .....	51
<b>Tabla 3-19.</b> Resultados de simulación de mapa principal (capa 1 - SCQM) para el diseño factorial fraccionado $2^{15-9}$ .....	52
<b>Tabla 3-20.</b> Estadísticos resumen de las variables respuesta del modelo. ....	53
<b>Tabla 3-21.</b> Análisis de varianza para Desempeño en Abastecimiento.....	54
<b>Tabla 3-22.</b> Análisis de varianza para Desempeño en Fabricación.....	55
<b>Tabla 3-23.</b> Análisis de varianza para Desempeño en Distribución.....	57
<b>Tabla 3-24.</b> Análisis de varianza para Desempeño en SCQM. ....	58



# Introducción

El enfoque de la Gestión de la Calidad (*Quality Management*) ha cambiado desde el escenario tradicional centrado en la empresa hasta sistemas completos de cadenas de suministro. Este cambio de enfoque ha ocasionado un cambio en las prioridades competitivas de muchas empresas, desde sólo la calidad del producto hasta la calidad global de la cadena de suministro (Kuei & Madu, 2001). La investigación en Gestión de Cadenas de Suministro (*Supply Chain Management*) se ha transformado desde un nivel operativo y táctico enfocado en el costo, la entrega y los riesgos, hasta un nivel estratégico más complejo y demandante (Foster, 2017; Melnyk, Lummus, Vokurka, Burns, & Sandor, 2009).

El estudio de la teoría y las prácticas de calidad en empresas individuales es usual, pero hay pocas investigaciones sobre cómo incorporar los requerimientos de calidad en el diseño y planeación de cadenas de suministro globales (Carmignani, 2009; Dellana & Kros, 2014; Mota, Gomes, Carvalho, & Barbosa-Povoa, 2015; Truong et al., 2016) y cómo vincular estas prácticas y sistemas de gestión con todos los socios de la cadena (Bayo-Moriones, Bello-Pintado, & Merino-Díaz-de-Cerio, 2011; Gylling, Heikkilä, Jussila, & Saarinen, 2015; Truong, Sampaio, Sameiro, & Fernandez, 2016).

Por otra parte, una evidencia práctica de los problemas de calidad de productos y procesos en el contexto de las cadenas de suministro son los casos frecuentes de productos inseguros o defectuosos en el mercado, a pesar de las prácticas de control y aseguramiento de la calidad que regularmente implementan las empresas (Bray, Serpa, & Colak, 2019; Flynn & Zhao, 2015). Estos eventos de recogida de productos defectuosos o inseguros del mercado son una señal de alerta de malfuncionamiento en la coordinación e integración de la función de calidad de una organización con sus socios en la parte ascendente o descendente de la cadena de suministro (Kumar & Schmitz, 2011; Sharma, Garg, & Agarwal, 2014; Wood, Wang, Olesen, & Reiners, 2017).

Un caso típico de la influencia de la cadena de suministro sobre la calidad del producto fue el problema de sobrecalentamiento de un banco de baterías en las primeras unidades que salieron al mercado del avión Boeing 787 Dreamliner. Una de las causas principales fue el cambio en la cadena de suministro. Para la fabricación de este modelo de avión, la empresa cambió la configuración tradicional convergente en una sola planta de ensamblaje a un nuevo esquema con alta deslocalización y tercerización, donde no fue posible detectar la falla del proveedor de las baterías (Song, Li, Song, & Zhang, 2014).

En lo referente a las tendencias de investigación, Evans, Foster y Linderman (2014) establecen que las corrientes actuales de investigación en gestión de calidad se centran en el desarrollo de modelos cuantitativos, análisis de contingencias globales, la calidad en la cadena de suministro, las tecnologías de información y los beneficios estratégicos. Los autores, también afirman que se han desarrollado pocos trabajos sobre el desempeño de la calidad en la cadena de suministro y sobre cómo la cooperación puede llevar a un mejor desempeño en la calidad y sobre el desarrollo de proveedores y las relaciones entre la selección de proveedores y la calidad.

En ese mismo sentido, Lejarza y Baldea (2020) consideran que las investigaciones sobre estrategias y prácticas de gestión de la calidad en cadenas de suministro que se han desarrollado han adoptado en su gran mayoría un enfoque operativo y se requiere evaluar estructuras de red para la toma de decisiones táctico-estratégicas en el diseño integral de cadenas de suministro.

Es necesario, entonces, estudiar los vínculos entre los factores críticos de la calidad en la cadena de suministro y su influencia en los indicadores de desempeño global de la misma. Aunque se han desarrollado investigaciones sobre las estrategias y prácticas de gestión de la calidad en cadenas de suministro, estas han adoptado en su gran mayoría un enfoque descriptivo basado en el análisis de resultados de encuestas de percepción.

Lo anterior evidencia la pertinencia de esta investigación tanto desde el punto de vista académico como empresarial, dado que se hace una contribución para abordar una problemática social y empresarial desde el enfoque del modelado analítico multi-etapas. De igual manera, los desarrollos previos realizados y socializados han tenido aceptación por parte de la comunidad académica tanto del área de gestión de cadenas de suministro, como del área de modelado con sistemas difusos.

### ▪ **Objetivos de la investigación**

Esta tesis doctoral tiene como objetivo general desarrollar un modelo analítico multi-etapas para la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro con el fin de superar los modelos descriptivos actuales, incorporando múltiples productos, múltiples niveles de la cadena de suministro y con indicadores de desempeño y funciones objetivo adecuados.

Para el logro del objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar las dimensiones y elementos del constructo “gestión de la calidad en cadenas de suministro usando un enfoque multi-etapas”.
- Determinar los elementos de un modelo analítico para la coordinación e integración de la gestión de la calidad en el contexto de las cadenas de suministro.
- Elaborar un modelo analítico para la gestión de la calidad en cadenas de suministro integrando técnicas de modelado multi-etapas.
- Validar el modelo propuesto a través de técnicas apropiadas, con el fin de establecer su adecuación a la complejidad de actores y elementos de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, en comparación con los modelos tradicionales.

### ▪ **Hipótesis de la investigación**

Con base en lo anterior, se planteó la siguiente hipótesis de investigación:

El uso de metodologías de modelado multi-etapas en el desarrollo de un modelo analítico, permitirá representar la coordinación e integración de la gestión de la calidad en el contexto de las cadenas de suministro y superar las falencias identificadas en los modelos tradicionales, considerando múltiples niveles de la cadena de suministro y con indicadores de desempeño adecuados.

### ▪ **Aportes de la investigación**

El vacío de conocimiento que la investigación aborda es la falta de aportes académicos para el estudio de la coordinación e integración de la gestión de la calidad en el contexto

de las cadenas de suministro desde un enfoque relacional táctico-estratégico, considerando múltiples niveles de la cadena de suministro y con indicadores de desempeño adecuados.

La originalidad e importancia de esta investigación se fundamenta en:

- a) El desarrollo de un nuevo modelo analítico que representa la complejidad de la gestión de la calidad en el contexto de incertidumbre de las cadenas de suministro, considerando las tres etapas principales de abastecimiento, fabricación y distribución y basado en el comportamiento microscópico de las interrelaciones de las variables de estado de cada etapa.
- b) Si bien en la literatura se han propuesto modelos para la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, hasta la fecha no se ha considerado una metodología de modelado multi-etapa que integre el modelado con mapas cognitivos grises difusos y el diseño de experimentos en el estudio de este sistema.

Este documento de memoria de tesis doctoral está estructurado en cinco capítulos de la siguiente manera: en el capítulo 1 se presenta la fundamentación teórica a través de una revisión sistemática de literatura sobre modelado analítico de la gestión de la calidad en cadenas de suministro. En el capítulo 2 se describen los fundamentos metodológicos de la investigación y se muestran los trabajos previos desarrollados. En el capítulo 3 se presenta el desarrollo del modelo analítico multi-etapa de la gestión de la calidad en cadenas de suministro. En el capítulo 4 se realiza la discusión de los principales resultados de la investigación y se muestran las publicaciones realizadas y sometidas y los productos de formación de recursos humanos. Finalmente, en el capítulo 5 se abordan las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

# 1. La Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro

En este capítulo se presentan los principales elementos teóricos de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, como un objeto de estudio relativamente nuevo, producto de la integración de los conceptos tradicionales de gestión de cadenas de suministro y gestión de la calidad. Para ello, se parte desde los conceptos de cadena de suministro y Gestión de Cadenas de Suministro (*Supply Chain Management, SCM*) y se describe su evolución hasta el concepto de Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro (*Supply Chain Quality Management, SCQM*).

Una cadena de suministro es una red de empresas involucradas en diferentes procesos y actividades para agregar valor a productos y servicios desde los proveedores hasta el cliente final (Harrison, Van Hoek, & Skipworth, 2014; Slack & Lewis, 2017). Está compuesta de todas las partes involucradas en la satisfacción del cliente y al interior de cada organización incluye las funciones involucradas en la recepción y satisfacción de los requerimientos del cliente (Chopra, 2018). Incluye las instalaciones de proveedores, centros de producción, almacenes, centros de distribución y puntos de venta, así como también las materias primas, inventario en proceso y producto terminado que fluyen entre estas instalaciones (Simchi-Levi, Chen, & Bramel, 2014). Para Coyle et al (2017) una cadena de suministro es la integración de empresas ampliadas que rebasan sus fronteras individuales para implementar un flujo bidireccional de productos, información, dinero y demanda.

Partiendo de la conceptualización previa sobre cadena de suministro, es posible abordar el concepto de Gestión de Cadenas de Suministro (SCM) como las acciones que determinan el comportamiento de la cadena de suministro para obtener el desempeño deseado. Chopra (2018) define SCM como la gestión de activos y del flujo de bienes,

servicios, información y dinero para maximizar el superávit de la cadena. Hugos (2018) establece que SCM es la coordinación de producción, inventario, ubicaciones y transporte entre los miembros de una cadena de suministro para lograr la mejor combinación de capacidad de respuesta y eficiencia en el mercado atendido. El *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP) define SCM como la planeación y gestión de todas las actividades relacionadas con el abastecimiento y adquisición, transformación y todas las actividades de la gestión logística, e incluye la coordinación y colaboración con socios del canal, que pueden ser proveedores, intermediarios, proveedores de servicios externos y clientes (Council of Supply Chain Management Professionals, n.d.).

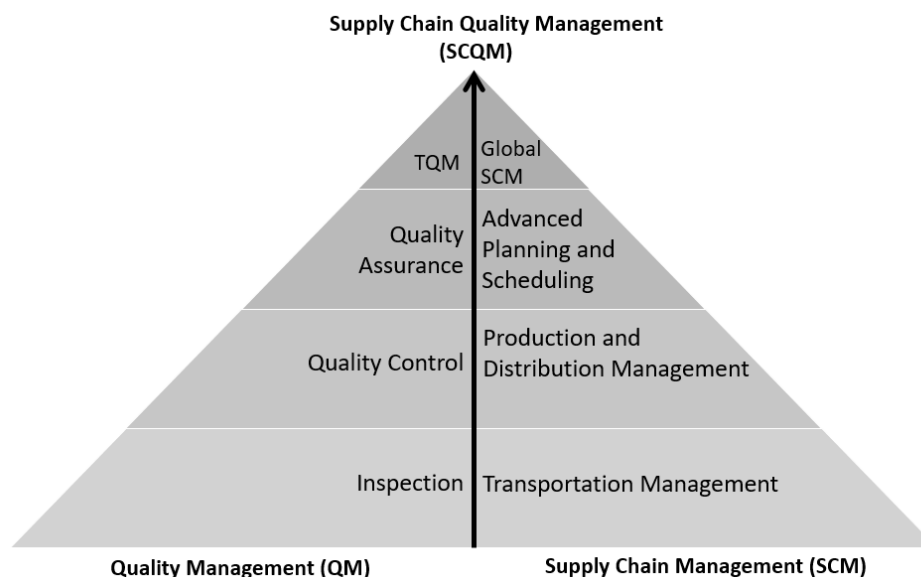
SCM comprende la planeación, diseño y control de los flujos de materiales, información y dinero a lo largo de la cadena de suministro para ofrecerle al cliente final un valor superior de manera efectiva y eficiente (Sanders, 2018; Shah, 2016). SCM se basa en la colaboración entre las empresas para lograr un posicionamiento estratégico común y el mejoramiento de la eficiencia operativa (Bowersox, Closs, Cooper, & Bowersox, 2020). SCM tiene un enfoque estratégico y se basa en el uso de sistemas de información integrados en toda la cadena de suministro (Rushton, Croucher, & Baker, 2017).

## **1.1 Origen del concepto de Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro**

El concepto de Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro (*Supply Chain Quality Management, SCQM*) es producto de la integración de los conceptos Gestión de Cadenas de Suministro (*Supply Chain Management, SCM*) y Gestión de la Calidad (*Quality Management, QM*) y de la evolución de estos desde un enfoque operacional hasta un enfoque estratégico (Figura 1-1).

En lo referente a la Gestión de la Calidad (QM), al principio, su énfasis era la inspección de los artículos con el fin de identificar defectos y defectuosos antes de su despacho al mercado. Luego, se aplicaron sistemáticamente técnicas estadísticas para resolver problemas de calidad, derivando en el concepto de control de la calidad. Posteriormente, el aseguramiento de la calidad amplió la responsabilidad por la calidad a funciones organizacionales distintas a las operativas y usando técnicas estadísticas más sofisticadas. Hoy, la calidad es un asunto estratégico, desplegado en toda la organización

e involucra a clientes y proveedores (*Total Quality Management*) (Evans et al., 2014; Foster, 2017; Slack, Brandon-Jones, & Johnston, 2016; Zimon, 2017).



**Figura 1-1.** Esquema conceptual de *Supply Chain Quality Management*.

Por otro lado, la primera etapa de la Gestión de Cadenas de Suministro (SCM) fue la investigación logística basada en la gestión del transporte en sistemas multimodales. Luego, fue necesaria la consideración conjunta de almacenamiento, manejo de materiales y transporte de carga, a través del concepto de Gestión de Producción y Distribución. El posterior auge de los sistemas de planeación de recursos empresariales (*Enterprise Resource Planning*, ERP) permitió integrar múltiples bases de datos y mejorar la precisión para planificar e integrar operaciones logísticas, surgiendo la etapa de Planificación y Programación Avanzadas.

Hoy, la Gestión de Cadenas de Suministro está asociada con problemas estratégicos de las tendencias actuales de mercados globales, tales como la coordinación de redes de suministro complejas, toma de decisiones sobre tercerización o deslocalización, recogida de productos defectuosos en el mercado, responsabilidad social, entre otros (Cogollo Flórez & Ruiz Vásquez, 2019; Cooper, Lambert, & Pagh, 1997; Cruz Trejos, Correa Espinal, & Cogollo Florez, 2012; Narasimhan, Venkatasubbaiah, & Avadhani, 2013; Wieland, Handfield, & Durach, 2016).

## 1.2 Definiciones de Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro

Con respecto a los aportes teóricos identificados en la literatura con definiciones de Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro, se destaca inicialmente el trabajo de Kuei y Madu (2001), quienes usaron un enfoque de tres ecuaciones para desarrollar su propuesta de definición de SCQM: SC = red de producción-distribución, Q = satisfacer correctamente las demandas del mercado y satisfacer al cliente en forma rápida y rentables, y M = favorecer condiciones y la confianza para la calidad en la cadena de suministro. En este enfoque, el desempeño de la calidad en la cadena de suministro depende de la relación entre compradores y vendedores.

Robinson y Malhotra (2005) establecieron que SCQM es la “coordinación e integración formal de los procesos de negocio que implican todas las organizaciones asociadas en la cadena de suministro para medir, analizar y mejorar continuamente los productos, servicios y procesos con el fin de crear valor y lograr la satisfacción de los clientes intermedios y finales en el mercado”. Foster (2008) considera que SCQM es un enfoque sistémico para mejorar el desempeño aprovechando las oportunidades creadas por los vínculos entre proveedores y clientes.

Parast (2013) afirma que SCQM es la coordinación e integración de los procesos interempresas de todos los miembros de la cadena de suministro a través del mejoramiento continuo, con el fin de mejorar el desempeño y lograr la satisfacción del cliente haciendo énfasis en el aprendizaje cooperativo. Flynn y Zhao (2015) definieron SCQM como un sistema de gestión integral para mejorar la calidad en una cadena de suministro a través de seis elementos clave: liderazgo de la cadena de suministro, diseño estratégico de la cadena de suministro, sistema de gestión de la calidad aguas arriba, sistema de gestión de la calidad aguas abajo, integración de la calidad interna y estrategia de recogida de productos defectuosos.



---

### **1.3 Colaboración, coordinación e integración en la Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro**

El funcionamiento eficiente de una cadena de suministro, en el sentido de lograr alinear entidades inicialmente separadas y mejorar el desempeño global de la cadena de suministro, requiere de actividades y decisiones de colaboración, coordinación e integración (Moharana, Murty, Senapati, & Khuntia, 2012). Aunque en ocasiones los conceptos de colaboración, coordinación e integración se utilizan indistintamente para referirse al trabajo conjunto en la gestión de cadenas de suministro, es necesario establecer que tienen diferentes significados y alcances.

La colaboración se refiere al trabajo conjunto o con alguien con el fin de lograr un propósito específico. La colaboración entre los miembros de la cadena de suministro implica que ellos planifiquen, operen y ejecuten conjuntamente decisiones de negocio como una sola entidad (Sanders, 2018). En las cadenas de suministro colaborativas todos los miembros deben implementar las estrategias acordadas, independientemente de su tamaño, función o posición en la cadena (Montoya-Torres & Ortiz-Vargas, 2014; Montoya-Torres & Ortiz, 2011).

La coordinación se refiere a una cooperación activa y directa y se lleva a cabo enviando las señales correctas, compartiendo la información correcta o las mismas políticas. Implica un proceso interactivo que conduce a decisiones y actividades conjuntas (Moharana et al., 2012). La coordinación está orientada a garantizar los flujos de productos, información y dinero en la cadena de suministro, e incluye los flujos reversos de productos (Sanders, 2018). Aunque en términos de intensidad cooperativa, la colaboración puede ser vista como más intensa dado que implica un proceso conjunto e interactivo que da a lugar a decisiones y actividades conjuntas, esto no significa que la coordinación sea menos importante o relevante que la colaboración en la gestión de cadenas de suministro.

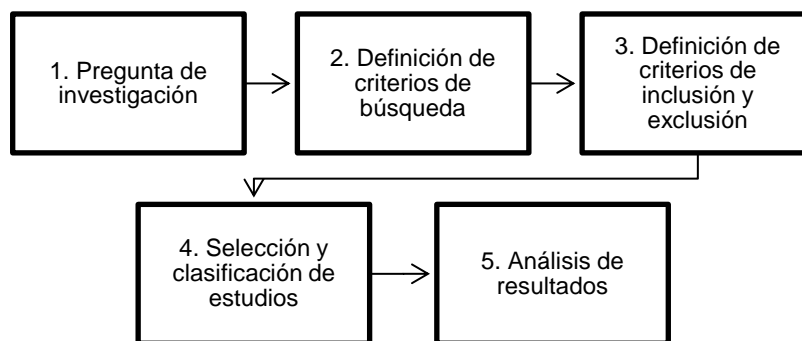
La integración es otro concepto de la gestión de cadenas de suministro que complementa la coordinación y la colaboración. La integración se refiere a “hacer un todo, reuniendo sus partes constitutivas”, esto, es, sincronizar requerimientos, conceptos y flujos de los miembros de la cadena con el objetivo de maximizar las ventajas competitivas y puede darse a nivel estratégico, táctico y operativo (Bautista-Santos et al., 2015).

Con base en lo anterior, es necesario establecer las diferencias entre la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro. Así, en esta tesis se establece la coordinación de SCQM como la relación entre las prácticas de Gestión de la Calidad orientadas a mejorar el desempeño global de la cadena de suministro. Similarmente, la integración de SCQM se refiere al desarrollo de una postura unificada (un lenguaje común) por todos los miembros de la cadena de suministro para gestionar en forma sincronizada los aspectos relacionados con la Gestión de la Calidad (Cogollo-Flórez & Correa-Espinal, 2019).

## **1.4 Antecedentes del modelado de la Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro**

En este apartado se presentan las principales contribuciones identificadas en la literatura sobre el modelado de la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, identificando los principales aportes, tendencias y oportunidades de investigación. Los resultados de esta revisión de literatura sobre antecedentes en el tema de investigación fueron publicados en el artículo “*Analytical modeling of supply chain quality management coordination and integration: A literature review*” en la revista *Quality Management Journal* 26 (2) (Cogollo-Flórez & Correa-Espinal, 2019) (ver Anexo A). Por tanto, lo mostrado en este numeral es una actualización de dicho artículo, incorporando los trabajos publicados en 2019 y 2020, dado que el periodo de búsqueda del artículo fue hasta 2018.

La metodología utilizada consistió en cinco etapas sistemáticas y estructuradas (Figura 1-2) bajo un esquema riguroso y objetivo que permite la búsqueda, identificación, interpretación y síntesis de la evidencia documental en un periodo de tiempo determinado (Kitchenham, 2004). En los siguientes apartados se describen y desarrollan cada una de las etapas de la metodología.



**Figura 1-2.** Etapas de la metodología de revisión de literatura.

### 1.4.1 Formulación de pregunta de investigación

Considerando la importancia del diseño y evaluación de cadenas de suministro enfocadas en la calidad, es necesario identificar cómo se puede coordinar e integrar la Gestión de la Calidad en el contexto de la Gestión de Cadenas de Suministro usando modelos analíticos. Para ello, se formuló la siguiente pregunta de investigación (PI):

PI: ¿Cuáles modelos analíticos para la coordinación e integración de SCQM se han propuesto en el periodo entre los años 2000 y 2020?

### 1.4.2 Definición de criterios de búsqueda

La búsqueda de la información fue llevada a cabo considerando los artículos publicados en revistas seriadadas e indexadas en las bases de datos *Science Direct*, *IEEE*, *Springer*, *Taylor & Francis* y *Emerald*, desde el año 2000 hasta el 2020.

Para el proceso de búsqueda se establecieron los siguientes criterios con la siguiente configuración: TITLE-ABSTR-KEY (XX) AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR AFT 2000. También, se usaron las siguientes palabras clave en títulos y resúmenes: “*Supply chain quality management*” AND *modelling*, “*Supply chain quality management*” AND *modeling*, “*Supply chain quality management*” AND *analytical model*, “*Supply chain quality management*” AND *coordination*, “*Supply chain quality management*” AND *coordinating*, “*Supply chain quality management*” AND *integration*, “*Supply chain quality management*” AND *integrating*, y “*Supply chain quality management*” AND *analysis*.

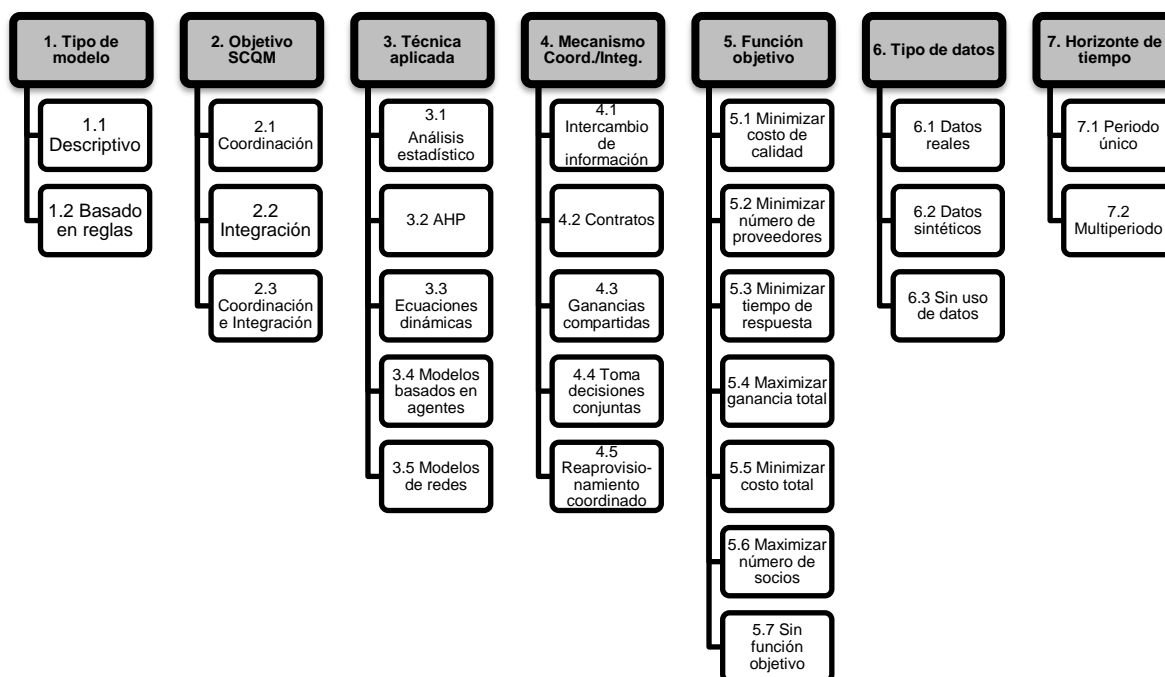
### **1.4.3 Definición de criterios de inclusión y exclusión**

Aplicando los criterios de búsqueda previamente establecidos en las bases de datos seleccionadas, se recuperaron un total de 441 publicaciones. Con el fin de seleccionar los documentos pertinentes al tópico de interés de la investigación, se determinaron dos criterios de inclusión: (i) El documento presenta un modelo para el análisis de SCQM, y (ii) El documento presenta un modelo analítico para la coordinación e integración de SCQM.

En forma análoga, se descartaron aquellos documentos que cumplían al menos uno de los siguientes criterios de exclusión: (i) El documento presenta un desarrollo teórico sobre Gestión de la calidad en empresas individuales, y (ii) El documento presenta un desarrollo teórico sobre Gestión de Cadenas de Suministro sin considerar la Gestión de la Calidad.

### **1.4.4 Selección y clasificación de estudios**

Las 441 publicaciones obtenidas en el proceso de búsqueda se analizaron mediante la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión definidos previamente y, posteriormente, se seleccionaron 32 artículos definitivos. La clasificación de los aportes de estos artículos a la investigación en el área de interés (modelado analítico de la coordinación e integración de SCQM) se realizó usando un enfoque taxonómico (Reisman, 2004), como se muestra en la Figura 1-3. La taxonomía tiene dos niveles de clasificación (categorías y subcategorías), las cuales se determinaron luego de la lectura y análisis de los artículos seleccionados. El primer nivel se compone de las siguientes categorías: (1) Tipo de modelo, (2) Objetivo de SCQM, (3) Técnica aplicada, (4) Mecanismo de coordinación y/o integración, (5) Función objetivo, (6) Tipo de datos, y, (7) Horizonte de tiempo.



**Figura 1-3.** Clasificación taxonómica del modelado analítico de la coordinación e integración de SCQM

Al interior de las categorías, cada artículo es caracterizado en función de su aporte y cumplimiento de una o varias de las subcategorías presentadas. La primera categoría, tipo de modelo, comprende la clasificación principal de cada artículo y se toma del trabajo de Sayama (2015) para clasificar modelos científicos. Después de identificar el tipo de modelo, en la segunda categoría se especifica el objetivo del modelo SCQM (coordinación y/o integración). La tercera categoría, técnica aplicada, se refiere a las herramientas o técnicas de modelado usadas en cada estudio. La cuarta categoría, mecanismo de coordinación y/o integración, comprende las prácticas gerenciales requeridas para llevar a cabo la coordinación y/o integración de SCQM.

La quinta categoría, función objetivo, se refiere a la solución del modelo matemático presentado, clasificándolo en una o varias funciones objetivo o en la subcategoría “sin función objetivo”, la cual es característica principalmente de los modelos descriptivos. La sexta categoría, tipo de datos, se refiere a la aplicación del modelo usando datos reales o datos sintéticos y a la opción de modelos conceptuales que no son aplicados usando datos. La última categoría, horizonte de tiempo, se refiere a si los resultados del modelo son estáticos o dinámicos a lo largo del tiempo.

### 1.4.5 Análisis bibliométrico de resultados

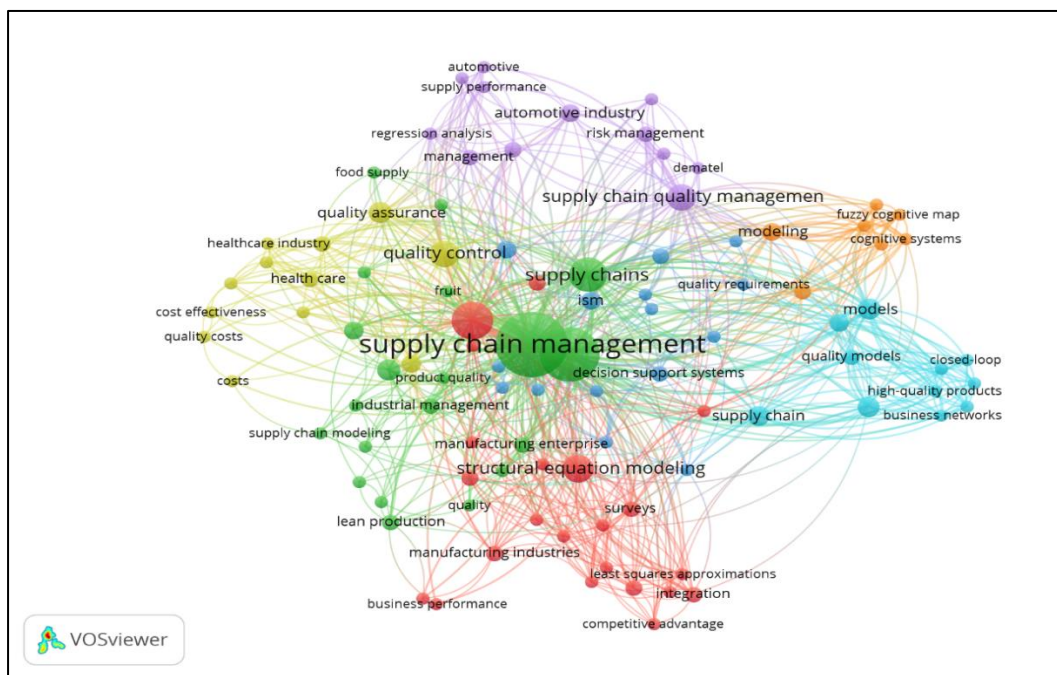
El análisis bibliométrico consiste en el estudio cuantitativo de un material bibliográfico con el fin de obtener una visión general de un tema de interés investigativo a partir de artículos, autores y revistas, identificando las temáticas actuales con mayor producción e influencia y las principales tendencias de investigación (Borner, Chen, & Boyack, 2003; Merigó & Yang, 2017). Con el fin de lograr el anterior propósito en el área de modelado de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, se utilizó la ecuación de búsqueda referente e indicada en Scopus como TITLE-ABS-KEY ("*supply chain management*" and "*quality management*" and "*modelling*"), obteniendo 71 resultados. Luego, se extrajeron los metadatos para ser analizados bibliométricamente por medio del software Vosviewer.

Para el análisis de co-ocurrencia de palabras clave utilizadas por los diferentes autores, se filtró nuevamente seleccionando un umbral para incluir el mínimo número de palabras claves. En este caso, para el mínimo número de ocurrencias de una palabra se seleccionó una cantidad de dos, generando 553 palabras, para un umbral de 99 palabras dentro del mapa. El mapa comprende principalmente siete clústeres que se encuentran identificados por colores, 795 líneas de enlace entre palabras y 1301 líneas de enlace con mayor afinidad y que abarcan una totalidad de palabras según la palabra clave más representativa y de mayor fortaleza por medio de los clústeres (Figura 1-4).

El clúster número 1, de color rojo, denominado "*total quality management*" es una de las palabras clave utilizadas dentro del mapa, debido a los diferentes enlaces donde es nombrada en la mayoría de los artículos relacionados. Dentro del clúster se encuentran palabras claves como análisis de información, integración, industrias manufactureras, desempeño operacional, gestión de calidad del producto, modelado de ecuaciones estructurales y gestión total de la calidad. Estas, constituyen 56 palabras entrelazadas, 113 palabras de mayor afinidad y 18 ocurrencias dentro del mapa.

El clúster número 2, de color verde, se denomina "*supply chain management*" y contiene las palabras clave "*quality management*" y "*supply chains*", como las de mayor interacción dentro del mapa y más usadas en los artículos por los diferentes autores. También se encuentran palabras como gestión de cadena de suministro global, calidad del producto, producción *Lean*, sistemas de gestión de la calidad, prácticas de gestión de la calidad, modelado de la cadena de suministro y modelos de investigación. El clúster cuenta con 240 palabras enlazadas entre sí, 628 palabras de mayor afinidad dependiendo del enlace

y 107 ocurrencias de estas 3 palabras dentro del mapa y en la mayoría de los artículos relacionados.



**Figura 1-4.** Mapa bibliométrico de resultados.

El clúster número 3, de color amarillo, denominado “*quality control*” identifica también palabras claves como rentabilidad, análisis de fallas, aseguramiento de la calidad, costos de calidad e industria. Tiene 36 palabras enlazadas entre sí, 60 palabras de mayor afinidad y 9 ocurrencias dentro del mapa. El clúster número 4, de color morado, denominado “*supply chain quality management*” identifica palabras claves como gestión de riesgos de la cadena de suministro, desempeño del suministro, análisis descriptivo y gestión total de la calidad, con 35 palabras enlazadas entre sí, 71 palabras con mayor afinidad y 9 ocurrencias.

El clúster número 5, de color azul claro, denominado “*models*” identifica palabras como iniciativa de mejora de procesos, modelos de calidad, cadena de suministro y redes de negocio, con 30 palabras enlazadas entre sí, 63 palabras de mayor afinidad y 6 ocurrencias en el mapa. El clúster número 6 “*modelling*”, de color naranja, identifica palabras claves

como mapas cognitivos difusos, sistemas cognitivos, toma de decisiones y sistemas a gran escala. Cuenta con 18 palabras enlazadas entre sí, 35 palabras con mayor afinidad y 4 ocurrencias dentro del mapa.

### **1.4.6 Análisis taxonómico de resultados**

El análisis de resultados se centra en la respuesta a la pregunta de investigación planteada inicialmente: los modelos analíticos para la coordinación e integración de SCQM propuestos entre 2000 y 2020. Para ello, inicialmente, se aplicó la taxonomía de la Figura 1-3 para clasificar los 32 artículos seleccionados en las respectivas categorías y subcategorías (Tabla 1-1). El cumplimiento de los atributos de cada subcategoría se marca con una "X" en las celdas respectivas y el valor de la última fila corresponde al porcentaje de artículos que cumplen el atributo de cada subcategoría.

En la Tabla 1-1 se observa que no hay columnas en blanco, las subcategorías marcadas solo una vez constituyen el 14.8% y las subcategorías marcadas dos o tres veces son el 7.4%. Por lo tanto, el 77.8% de las subcategorías están marcadas cuatro o más veces, lo cual permite establecer que la taxonomía desarrollada es sólida para clasificar de forma concisa los documentos seleccionados en la revisión de literatura sobre modelado analítico de la coordinación e integración de la Gestión de Calidad en Cadenas de Suministro.

De los 32 artículos seleccionados, 13 (41%) mostraban desarrollos y/o aplicaciones de modelos descriptivos para la coordinación e integración de SCQM, aplicando técnicas de análisis estadístico como análisis de correlación multivariado, análisis factorial confirmatorio, análisis clúster y análisis de componentes principales. 19 artículos (59%) mostraban modelos basados en reglas aplicando, principalmente, ecuaciones dinámicas y modelado basado en agentes.

Así, se evidencia un interés creciente en el desarrollo de modelos basados en reglas para la coordinación e integración de SCQM, dado que el 79% de estudios con este tipo de modelos han sido publicados en los últimos diez años. Con respecto a los objetivos de los modelos, la mayoría de los documentos (41% de los artículos seleccionados) mostraban modelos basados en reglas para la coordinación de SCQM, 6% para la integración de SCQM y 13% para la coordinación e integración de SCQM.



Tabla 1-1. Resultados de clasificación taxonómica de los artículos seleccionados.

Autor (año)	1. Tipo de modelo		2. Objetivo SCQM			3. Técnica aplicada					4. Mecanismo Coord./Integ.				5. Función objetivo						6. Tipo de datos			7. Horizonte de tiempo				
	1.1 Descriptivo	1.2 Basado en reglas	2.1 Coordinación	2.2 Integración	2.3 Coordinación e Integración	3.1 Análisis estadístico	3.2 AHP	3.3 Ecuaciones dinámicas	3.4 modelos basados en agentes	3.5 Modelos de redes	4.1 Intercambio de información	4.2 Contratos	4.3 Ganancias compartidas	4.4 Toma decisiones conjuntas	4.5 Reaprovisionamiento coordinado	5.1 Minimizar costo de calidad	5.2 Minimizar número de proveedores	5.3 Minimizar tiempo de respuesta	5.4 Maximizar ganancia total	5.5 Minimizar costo total	5.6 Maximizar número de socios	5.7 Sin función objetivo	6.1 Datos reales	6.2 Datos sintéticos	6.3 Sin uso de datos	7.1 Periodo único	7.2 Multiperiodo	
Cheung & Leung (2000)		X	X				X							X	X									X		X		
Tsai & Wang (2004)		X	X				X			X					X	X						X						X
Narasimhan & Nair (2005)	X		X			X							X	X							X	X			X		X	
Kuei <i>et al.</i> (2008)		X			X			X					X	X			X							X		X		
Lou <i>et al.</i> (2009)		X	X					X		X		X						X					X		X		X	
Das & Sengupta (2010)		X	X				X				X	X			X				X				X				X	
Sun & Li (2010)		X		X				X					X								X		X		X		X	
Yan <i>et al.</i> (2010)		X			X				X	X								X						X		X		
Mendes Dos Reis (2011)	X				X	X				X			X								X	X			X		X	
Bayo-Moriones <i>et al.</i> (2011)	X		X			X				X											X	X			X		X	
Su & Liu (2011)		X	X				X			X	X							X					X				X	
Xiao <i>et al.</i> (2011)		X	X				X				X	X						X					X		X		X	
Kuei <i>et al.</i> (2011)	X			X			X						X								X	X			X		X	
Romero <i>et al.</i> (2012)		X	X					X					X								X			X		X		
Liu <i>et al.</i> (2012)		X	X						X				X		X								X		X		X	
Wu <i>et al.</i> (2013)	X		X			X				X	X										X			X		X		
Fernandes <i>et al.</i> (2014)	X			X		X				X											X			X		X		
Yoo (2014)		X	X				X				X	X			X			X					X				X	
Chaghooshi <i>et al.</i> (2015)	X		X			X				X											X	X			X		X	
Huo <i>et al.</i> (2016)	X			X		X							X								X	X			X		X	
Gao <i>et al.</i> (2016)		X	X				X					X						X					X		X		X	
Modak <i>et al.</i> (2016)		X	X				X					X	X	X				X					X				X	
Zhang <i>et al.</i> (2017)	X			X		X							X								X	X			X		X	
Masoudipour <i>et al.</i> (2017)		X	X				X					X	X					X				X			X		X	
Pang & Tan (2018)		X			X		X					X	X					X					X		X		X	
Sarkar <i>et al.</i> (2018)		X	X				X						X					X					X		X		X	
Yu & Huo (2018)	X			X		X																						
Ajalli & Mozaffari (2018)	X			X		X				X	X			X							X	X			X		X	
Yoo & Cheong (2018)	X			X		X							X								X	X			X		X	
Lambertini (2018)		X			X		X				X	X						X					X		X		X	
Peng <i>et al.</i> (2019)		X		X			X					X						X						X		X		
Parast (2019)	X			X		X				X			X								X	X			X		X	
<b>TOTAL (%)</b>	41	59	56	28	16	34	6	41	13	6	38	34	16	53	13	19	3	3	34	3	3	47	38	47	16	84	16	

Los mecanismos de coordinación y/o integración más usados en los modelos analizados son toma de decisiones conjuntas (53%), intercambio de información (38%) y contratos (34%). Se destaca que en el 47% de los casos se utilizan al menos dos mecanismos simultáneos, lo que permitiría deducir que un solo mecanismo no sería suficiente para garantizar que la coordinación e integración de SCQM sea efectiva.

Con relación a las funciones objetivo, las principales son maximizar la ganancia total (34% de los documentos) y minimizar el costo de calidad (19% de los documentos). No obstante, 47% de los modelos no tienen función objetivo, esto se debe a que su propósito no es resolver un problema de optimización, sino establecer el grado de asociación entre las variables de coordinación e integración de SCQM usando herramientas de la estadística descriptiva.

En cuanto a la característica de los datos usados para las aplicaciones de los modelos, hay una ligera ventaja en el uso de datos sintéticos (47%) con respecto a los datos reales (38%). Adicionalmente, la mayoría de los modelos (84%) obtienen resultados que son aplicables a un periodo de tiempo único y sólo el 16% de los modelos son multiperiodos. Por lo tanto, esta última subcategoría constituye una oportunidad de investigación en el contexto dinámico e incierto de las cadenas de suministro actuales.

## **1.5 Conclusión**

En este capítulo se presentaron los principales elementos teóricos que fundamentan el área de estudio de la investigación. Se describió la evolución conceptual de la Gestión de Cadenas de Suministro y de la Gestión de la Calidad y cómo su combinación dio origen al concepto de Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro. Igualmente, se presentaron y diferenciaron los conceptos de colaboración, coordinación e integración en la gestión de cadenas de suministro y se propuso la ampliación de su alcance para el logro de un lenguaje común con respecto al desempeño en calidad de las cadenas de suministro.

Finalmente, se mostraron los resultados de una revisión sistemática de literatura sobre el modelado analítico de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, donde se analizaron 32 artículos recuperados siguiendo los criterios de inclusión y exclusión definidos. Un aporte importante de este capítulo es la clasificación taxonómica realizada sobre el problema de investigación, dado que es no se encontraron referentes del

desarrollo de este tipo de herramientas en esta temática. Esto permitió tener un panorama completo de los trabajos previos en el tema de la investigación y validar la hipótesis inicial dado que no recuperaron trabajos donde se aplique el enfoque de modelado multi-etapa para estudiar la gestión de la calidad en cadenas de suministro. Con el desarrollo de estos elementos fue posible el logro del primer objetivo específico de la investigación, dado que se caracterizaron las dimensiones y elementos del constructo de gestión de la calidad en cadenas de suministro usando un enfoque multi-etapas.



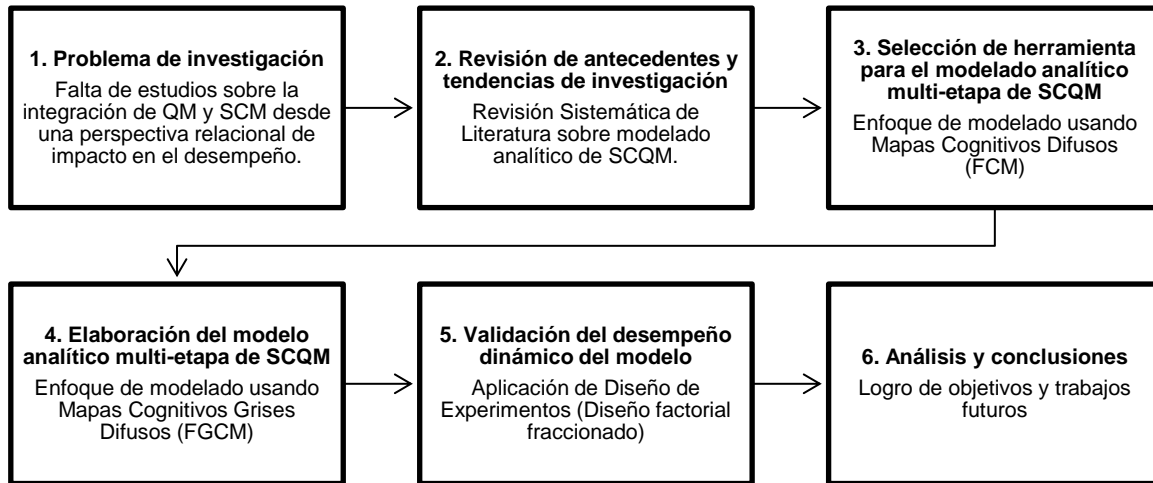
## **2. Fundamentos metodológicos y desarrollos previos de la investigación**

En este capítulo se describen el diseño metodológico y los fundamentos teóricos de las técnicas y herramientas que se integraron para el logro de los objetivos de esta investigación. Se utilizó una metodología secuencial exploratoria que permite integrar referentes teóricos para un posterior análisis cuantitativo (Creswell & Creswell, 2018) . En este enfoque, se usan los hallazgos de una primera fase exploratoria para identificar y estructurar las variables de un nuevo modelo, que se prueba durante una segunda fase cuantitativa (Edmonds & Kennedy, 2017).

### **2.1 Diseño metodológico de la investigación**

La ejecución de esta investigación de tipo secuencial exploratoria se llevó a cabo aplicando el diseño metodológico mostrado en la Figura 2-1. La fase exploratoria inicial corresponde a las etapas 1, 2 y 3 de definición del problema de investigación, revisión de antecedentes y selección de herramienta para el modelado. La fase cuantitativa comprende las etapas 4, 5 y 6 de elaboración del modelo, validación del desempeño del modelo y análisis y conclusiones, respectivamente.

Como se describió en los capítulos previos, el problema de investigación o el vacío de conocimiento identificado es la necesidad de estudiar la gestión de la calidad cadenas de suministro como un problema complejo y de creciente interés académico y empresarial. Faltan desarrollos en propuestas de evaluación de estructuras relacionales para la toma de decisiones táctico-estratégicas en la gestión de cadenas de suministro, considerando variables de estado específicas del constructo “gestión de la calidad en cadenas de suministro”. La validez del problema y la necesidad de realizar desarrollos en el área de modelado analítico de SCQM se probó con la realización de una revisión sistemática de literatura sobre dicho tema (Cogollo-Flórez & Correa-Espinal, 2019).



**Figura 2-1.** Diseño metodológico de la investigación.

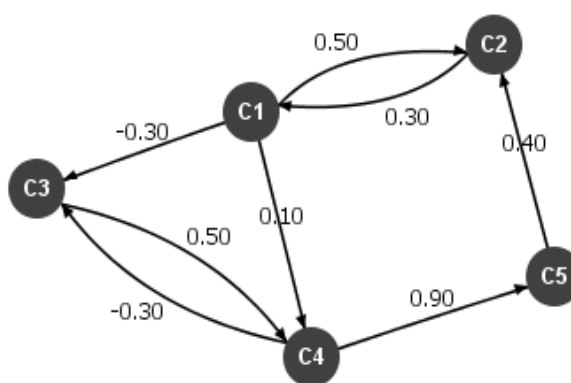
En el resto de este capítulo se desarrollan y sustentan los fundamentos conceptuales de las etapas 3 y 5 del diseño metodológico, selección de herramienta de modelado y de la técnica de validación del modelo. En enfoque de modelado del problema de SCQM usando mapas cognitivos difusos grises integrados con diseño de experimentos es novedoso y no se encontraron referentes en la literatura sobre ello. Con ello, se da respuesta al propósito general de la investigación de desarrollar un modelo analítico multi-etapa para la coordinación e integración de SCQM que supere el enfoque de los modelos descriptivos tradicionales.

## 2.2 Modelado con Mapas Cognitivos Difusos y Mapas Cognitivos Grises Difusos

### 2.2.1 Modelado con Mapas Cognitivos Difusos

Los Mapas Cognitivos Difusos (*Fuzzy Cognitive Maps*, FCM) son una herramienta para el modelado de sistemas complejos utilizando el conocimiento y experiencia humana y/o el conocimiento extraído de bases de datos en forma de reglas (Kosko, 1986). Los FCM son una combinación de la teoría de conjuntos difusos con el aprendizaje heurístico de las

redes neuronales (León, Rodríguez, García, Bello, & Vanhoof, 2010). Un FCM consta de variables o conceptos ( $C$ ) que representan el sistema estudiado y arcos dirigidos que representan las relaciones causales entre los conceptos (Figura 2-2). Los conceptos se denotan con los subíndices  $i$  (nodo causa) y  $j$  (nodo de efecto). Cada arco dirigido tiene asociado un peso  $w_{ij}$  en el intervalo  $[-1, +1]$ , que representa la fortaleza de la relación entre los conceptos  $i$  y  $j$ . Los pesos asignados a cada par de conceptos  $C_{ij}$  se almacenan en una matriz de adyacencia  $E$ .



**Figura 2-2.** Ejemplo de la representación de un FCM con cinco conceptos.

El modelado matemático se lleva a cabo después de construir el FCM y alimentar los datos de entrada de los conceptos. Los valores de los conceptos  $C_i$  en un tiempo  $t$  se representan por el vector de estado  $A_i(k)$ . El estado del FCM se describe por el vector de estado  $A(k) = [A_1(k), \dots, A_n(k)]$ . El valor  $A_i$  en un momento  $k+1$  se calcula como la suma del valor anterior de  $A_i$  en el momento anterior  $k$  con el producto del valor  $A_j$  del nodo  $C_j$  en el momento  $k$  y el valor del peso de la relación causa-efecto  $w_{ji}$  (Dickerson & Kosko, 1994):

$$A_i(k+1) = f \left( A_i(k) + \sum_{j=1}^n A_j(k) * w_{ji} \right) \quad (2.1)$$

donde  $f(\cdot)$  es una función de activación que da valores de conceptos en el rango  $[0, 1]$  y se formula de la siguiente manera:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-mx}} \quad (2.2)$$

donde  $m$  es un número real positivo y  $x$  es el valor  $A_i^{(k)}$  en el punto de equilibrio.

El comportamiento dinámico de los FCM depende de su estructura y del mecanismo de inferencia que define la forma de transición al pasar del estado  $k$  al estado  $k+1$ . Así, se pueden esperar tres resultados diferentes: (a) El vector de estado se asienta en un valor estacionario después de una serie de pasos finitos, alcanzando el llamado punto fijo, (b) El vector de estado se asienta periódicamente en un mismo valor después de un número finitos de pasos, o, (c) El vector de estado cambia caóticamente, lo que se denomina atractor caótico. Debido a las características del sistema modelado en esta investigación (SCQM), el resultado deseado o criterio de pare de la simulación es el de alcanzar un punto fijo.

Los FCM han sido aplicados para modelar sistemas en diversas áreas como administración, medicina, agricultura, gestión de procesos, entre otras. Papageorgiou et al. (2013) desarrollaron una metodología para modelar el rendimiento y el manejo de cultivos de manzanas usando FCM. En este modelo, los nodos representan los principales factores del suelo que afectan el rendimiento y los arcos dirigidos muestran las relaciones causa-efecto entre las propiedades del suelo y el rendimiento. El análisis realizado por los autores mostró la superioridad del enfoque de FCM en la predicción del rendimiento.

Poczeta y Papageorgiou (2018) desarrollaron un modelo de pronóstico de la demanda diaria de gas natural usando FCM, el cual permite actualizar la planeación de la prestación del servicio a largo plazo y sirve de soporte para la toma de decisiones relacionadas con emergencias y construcción de unidades adicionales. Papageorgiou, Markinos y Gemptos (2009) aplicaron FCM para el modelado del comportamiento de cultivos de algodón, determinado los terrenos mejor acondicionados para la producción de cierto tipo de algodón dada la disposición del terreno e identificaron las variables que afectan el rendimiento del cultivo, generando así cambios en sus características.

En el área del bienestar empresarial y los recursos humanos, los FCM han sido aplicados en el mejoramiento de la efectividad del sistema de gestión de salud y seguridad en el trabajo, facilitando la identificación del criterio crítico del proceso (Sklad, 2019). En el área de gestión de procesos, se han desarrollado aplicaciones de modelos FCM en la producción de bioetanol, identificando los factores más relevantes para reducir los costos



y facilitar la fabricación de dicho combustible (Konti & Damigos, 2018). Igualmente, se han aplicado FCM para modelar la producción de dimetil tereftalato, facilitando la ejecución del plan de producción en condiciones de incertidumbre, con variables no medidas y estados no definidos (Christova, Stylios, & Groumpos, 2003).

También, se han usado FCM para modelar las relaciones causales de sistemas de gestión de relaciones de partes interesadas (Susniene, Torma, Buruzs, Hatwágner, & Kóczy, 2014), para estimar el rendimiento de cultivos y obtener información sobre su variación en diferentes áreas del terreno (Mourhir, Papageorgiou, Kokkinos, & Rachidi, 2017) y para modelar el comportamiento del consumo de energía eléctrica en edificaciones residenciales e industriales (Mpelogianni, Marnetta, & Groumpos, 2015).

### 2.2.2 Modelado con Mapas Cognitivos Grises Difusos

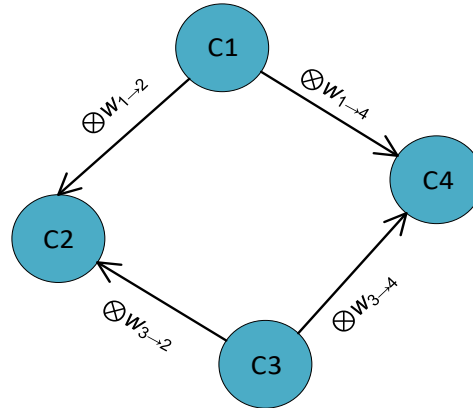
Los Mapas Cognitivos Grises Difusos (*Fuzzy Grey Cognitive Maps*, FGCM) son una extensión de los FCM y constituyen un enfoque de modelado flexible basado en la Teoría de Sistemas Grises (Salmeron, 2010). Permiten modelar la incertidumbre asociada a los valores de los pesos de las relaciones entre variables, asignándoles números grises en vez de los valores exactos asignados en los FCM.

Un número gris ( $\otimes g$ ) es aquel cuyo valor exacto es desconocido, pero se conoce el rango dentro del cual está incluido dicho valor. En la práctica, un número gris es un intervalo que puede tener sólo un límite inferior, sólo un límite superior o tanto límite inferior como límite superior. Cuando el número gris tiene límite inferior ( $\underline{g}$ ) y límite superior ( $\bar{g}$ ), se conoce como número gris intervalo y se define como  $\otimes g \in [\underline{g}, \bar{g}]$  (Liu & Lin, 2006).

Por consiguiente, en un FGCM los pesos de las relaciones causales entre los conceptos  $i$  y  $j$  se miden en términos de su intensidad gris y se expresan como:

$$\otimes w_{ij} \in [\underline{w}_{ij}, \bar{w}_{ij}] \mid \underline{w}_{ij} \leq \bar{w}_{ij}, \{\underline{w}_{ij}, \bar{w}_{ij}\} \in [-1, +1] \quad (2.3)$$

En la Figura 2-3 se muestra un ejemplo del esquema general de un FGCM con cuatro conceptos y la notación de los pesos grises de las relaciones causales entre ellos.



**Figura 2-3.** Ejemplo de un FGCM con cuatro conceptos.

El estudio de la convergencia de los FGCM es un tema de creciente interés en el área de los sistemas difusos dado que la incorporación de valores grises en las interrelaciones afecta el proceso de inferencia. En algunos casos se utiliza un enfoque de simplificación del mapa tomando como valor blanco el punto medio del intervalo de pesos grises, reduciendo el FGCM a un FCM, lo cual puede llevar a conclusiones erróneas. Por otro lado, la ejecución del proceso de inferencia con todas las posibles combinaciones de las interrelaciones podría llevar a soluciones no factibles (Lavin & Giabbanelli, 2017).

Debido a lo anterior, en esta investigación se integra el enfoque del diseño de experimentos en el proceso de inferencia del modelo de SCQM como técnica de validación del comportamiento dinámico del mismo. Específicamente, se utiliza el diseño factorial fraccionado, debido a las características y condiciones que se describen en el siguiente apartado.

### 2.3 Diseño factorial fraccionado $2^{k-p}$

En muchas situaciones experimentales cuando el número de tratamientos necesarios excede a los recursos, sólo se requiere información sobre los efectos principales y las interacciones de bajo orden, se necesitan estudios exploratorios para muchos factores o se hace la suposición de que sólo unos cuantos efectos son importantes, es de especial interés la aplicación de diseños experimentales factoriales fraccionados.

Un diseño factorial fraccionado es una parte o fracción de un diseño factorial completo, en el cual se reduce el número de corridas experimentales sin sacrificar la calidad de la

---

información relevante sobre los efectos significantes. La teoría de diseños factoriales fraccionados se basa en la jerarquización de los efectos: son más importantes los efectos principales, seguidos por las interacciones dobles, luego las triples, cuádruples, etc. (Gutiérrez & De La Vara, 2012).

En los diseños factoriales completos, para menos de cinco factores ( $k < 5$ ) los efectos potencialmente importantes superan en número a los efectos ignorables a priori, por tanto, si se fraccionan estos diseños, se pierde información que puede ser relevante. Por otro lado, cuando  $k \geq 5$ , el número de efectos ignorables supera el número de efectos no ignorables o potencialmente importantes, lo cual indica que estos diseños se pueden fraccionar muchas veces sin perder información valiosa. Mientras más grande es el valor de  $k$ , el diseño admite un grado de fraccionamiento mayor (Montgomery, 2017).

Un diseño factorial fraccionado es de resolución  $R$  si los efectos formados por la interacción de  $P$  factores no son alias de efectos de interacción que tengan menos de  $R-P$  factores. Los diseños más comunes son aquellos con resolución III, IV y V:

- **Resolución III:** diseño en el que ningún efecto principal se confunde con otro efecto principal, pero los efectos principales se confunden con interacciones de dos factores y éstas con otras interacciones de dos factores. Por ejemplo, el diseño  $2^{3-1}$  con relación definidora  $I = ABC$  es de resolución III.
- **Resolución IV:** diseño en el que ningún efecto principal se confunde con otro efecto principal o con una interacción de dos factores, pero éstos se confunden entre sí. Por ejemplo, el diseño  $2^{4-1}$  con relación definidora  $I = ABCD$  es de resolución IV.
- **Resolución V:** diseño en el que ningún efecto principal o interacción de dos factores se confunde con otro efecto principal o interacción de dos factores, pero estas últimas se confunden con las interacciones de tres factores. Por ejemplo, el diseño  $2^{5-1}$  con relación definidora  $I = ABCDE$  es de resolución V.

El diseño de experimentos y, en particular, los diseños factoriales y factoriales fraccionados se han aplicado como herramienta de validación de modelos de simulación computacional, permitiendo determinar los factores importantes con la menor cantidad de corridas de

simulación (Duman, 2007; J. Kleijnen, 2005; Law, 2017; Montevechi, De Almeida Filho, Paiva, Costa, & Medeiros, 2010). El uso del diseño de experimentos tiene ventajas ante el análisis de sensibilidad realizado variando un parámetro y dejando el resto fijos, dado que este último es estadísticamente ineficiente y no tiene en cuenta las interacciones entre factores (Law, 2015). La validación de investigaciones basadas en simulación a través del uso de diseño de experimentos permite incrementar la transparencia del comportamiento de los modelos de simulación y la efectividad del reporte de resultados (Lorscheid, Heine, & Meyer, 2012; Tarashioon, Van Driel, & Zhang, 2014).

En trabajos referentes, se ha utilizado el diseño factorial fraccionado para la validación de estudios de simulación y optimización aplicados en sistemas híbridos de energía renovables con gran número de factores e incertidumbre en los recursos y la demanda y compleja interacción entre factores (Chang & Lin, 2015). También, se han utilizado para validar modelos de simulación de factores que influyen en la capacidad de respuesta en estudios de seguridad contra incendios (Suard, Hostikka, & Baccou, 2013). Se evidencia, entonces, que es posible utilizar un diseño factorial fraccionado como mecanismo de validación de la herramienta de simulación del modelo desarrollado en esta investigación.

## **2.4 Desarrollos previos del proceso investigativo**

En este apartado se muestran las contribuciones previas realizadas en el marco de la investigación doctoral, donde se evidencian aportes secuenciales al área del modelado analítico de la gestión de la calidad en cadenas de suministro. Estos trabajos han sido socializados a la comunidad científica en congresos internacionales especializados en modelado y simulación y en sistemas difusos.

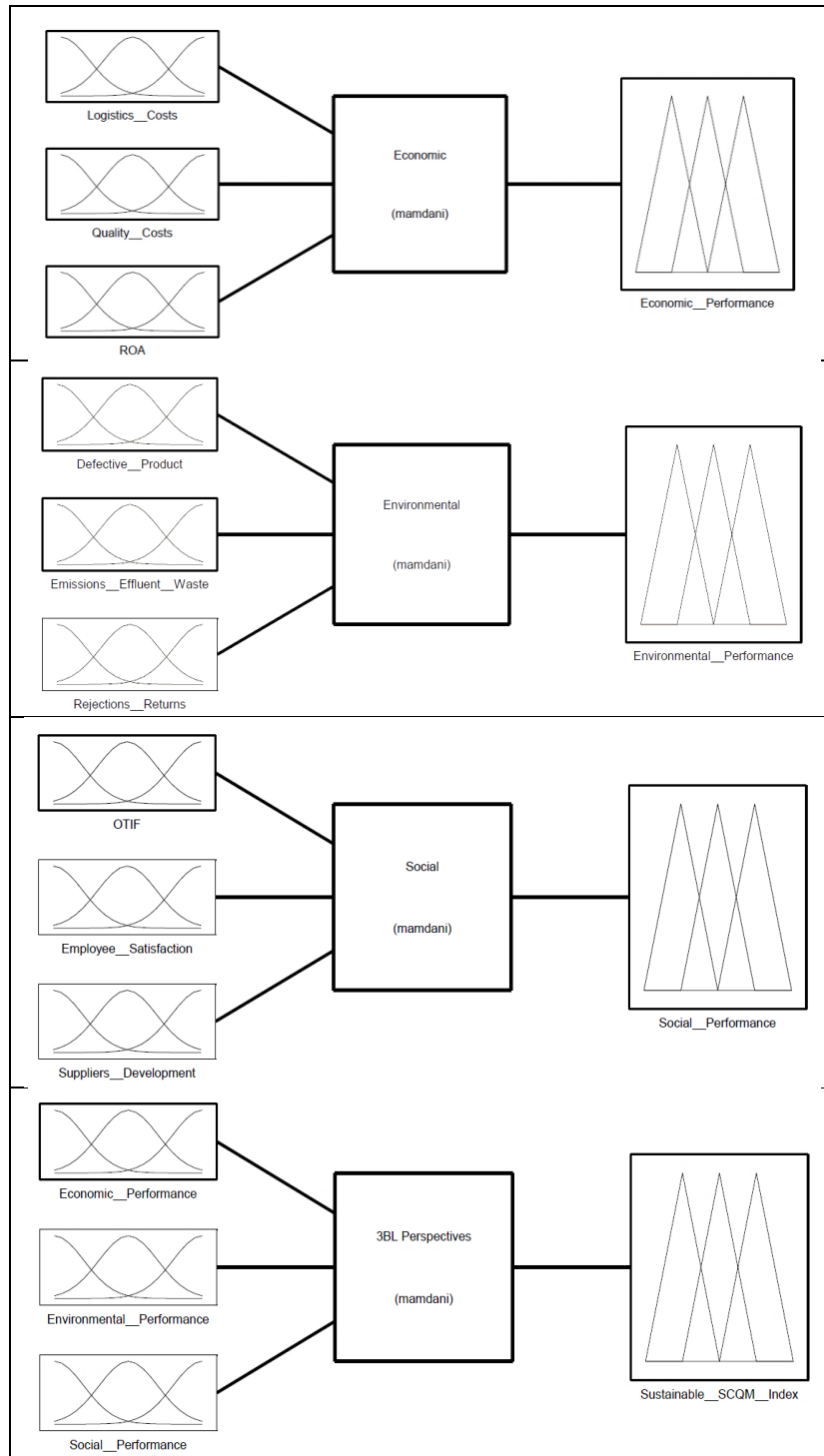
### **2.4.1 Modelo difuso para la medición del desempeño de SCQM**

Inicialmente, se desarrolló un modelo basado en reglas para la medición del desempeño de la gestión de la calidad en cadenas de suministro desde un enfoque de sostenibilidad (ver Anexo B). Este modelo integró la teoría de conjuntos difusos para el tratamiento de la imprecisión en la medición del desempeño ambiental, económico y social para, luego, obtener un índice de desempeño sostenible de la gestión de la calidad en cadenas de suministro (Cogollo-Flórez & Correa-Espinal, 2017).

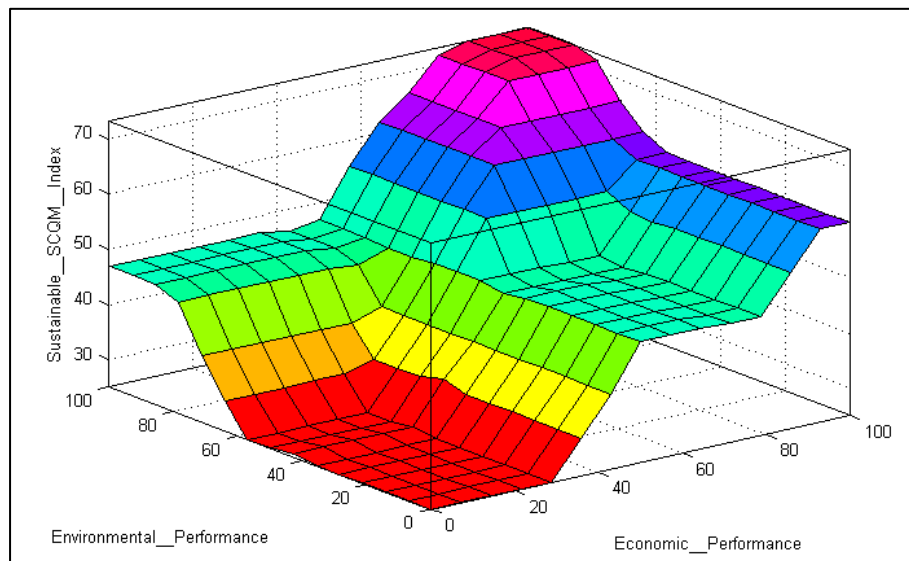
El desempeño económico es medido usando los indicadores de porcentaje de costos logísticos, porcentaje de costos de calidad y rentabilidad de los activos. El desempeño ambiental es medido a través del porcentaje promedio de producto defectuoso, porcentaje de emisiones, efluentes y desperdicios y porcentaje promedio de rechazos y devoluciones. El desempeño social comprende la satisfacción del cliente medida como el porcentaje de entregas OTIF (*On Time In Full*), la satisfacción de los empleados y el porcentaje de desarrollo de proveedores.

El modelo se basa en sistemas de inferencia difusa tipo Mandani para obtener un valor concreto del Índice de Desempeño a partir de reglas "*IF-THEN*" y aplicando relaciones de composición (Figura 2-4). En la Figura 2-5 se muestra un ejemplo de los resultados del modelo, la relación 3D entre los desempeños económico y ambiental y el índice sostenible de SCQM. En este caso, se evidencia que ambas variables de entrada contribuyen a la variable respuesta, sin embargo, el impacto del desempeño económico es mayor que el del desempeño ambiental, cuando estos tienen valores de entrada bajos.

Este enfoque de modelado difuso basado en reglas demostró su adecuado desempeño para tratar la imprecisión de las variables de entrada y obtener un número concreto como índice de desempeño sostenible de SCQM. Este modelo, *per se*, constituye un nuevo enfoque para modelar la imprecisión y la interrelación de variables económicas, ambientales y sociales en el contexto de la gestión de la calidad en cadenas de suministro.



**Figura 2-4.** Sistemas de inferencia difusa para medición del desempeño sostenible de SCQM



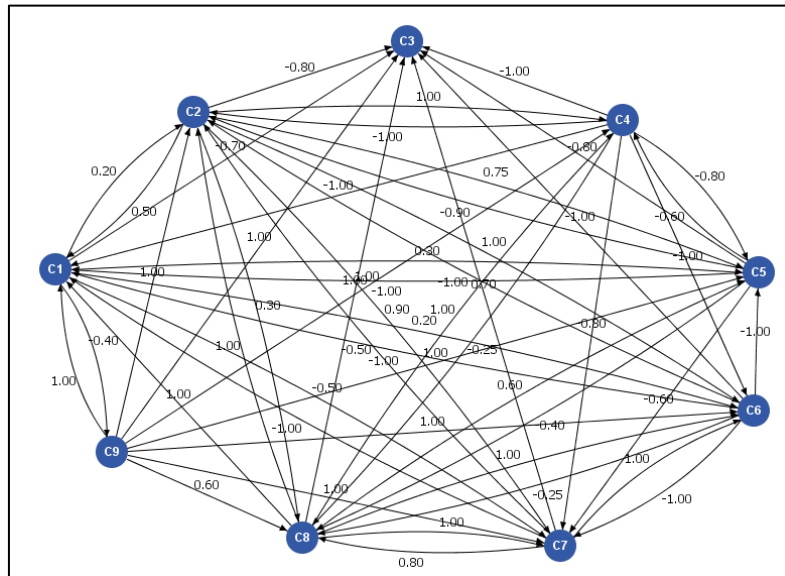
**Figura 2-5.** Relaciones 3D entre los desempeños económico y ambiental y el índice sostenible de SCQM.

### 2.4.2 Modelo de SCQM usando mapas cognitivos difusos

En la siguiente etapa de la investigación se exploraron nuevas herramientas del modelado analítico basado en reglas y se encontró que los mapas cognitivos difusos permiten modelar sistemas complejos a partir del conocimiento de expertos o datos del sistema en forma de reglas. También, este enfoque de modelado permite predecir y analizar influencias de eventos complejos usando el análisis de relaciones causales que cambian en el tiempo (Dickerson & Kosko, 1994; Jetter & Kok, 2014). Así, se desarrolló un modelo de mapa cognitivo difuso, el cual contiene nueve variables (conceptos) que representan la integración de SCQM (Cogollo-Flórez & Correa-Espinal, 2018) (Ver Anexo C).

El desarrollo del modelo constó de tres etapas: selección de variables y relaciones, ejecución del proceso de inferencia y análisis de convergencia. Las nueve variables seleccionadas fueron: C1-costos logísticos, C2-costos de calidad, C3-rentabilidad de los activos, C4-porcentaje de defectuosos en producción, C5-porcentaje de emisiones, efluentes y desperdicios, C6-porcentaje de rechazos y devoluciones, C7-OTIF, C8-satisfacción de empleados y, C9-porcentaje de desarrollo de proveedores. Los valores de las relaciones entre variables se establecieron a través del análisis de datos históricos de

la cadena de suministro en estudio y se construyó el mapa cognitivo difuso respectivo (Figura 2-6).

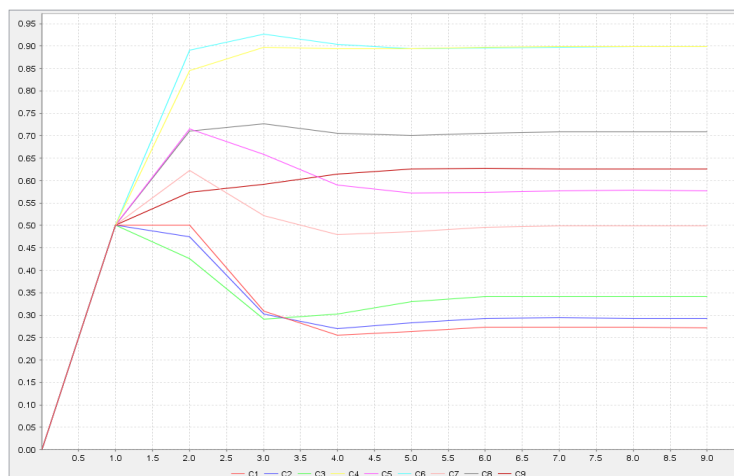


**Figura 2-6.** Modelo de Mapa Cognitivo Difuso de SCQM (FCM-SCQM)

El proceso de inferencia se llevó a cabo realizando simulaciones “*WHAT IF*” y la regla de activación de Kosko con memoria propia. La simulación “*WHAT IF*” se realiza multiplicando el vector de configuración de entrada que representa el estado de cada nodo con la matriz de adyacencia subyacente del mapa cognitivo difuso. Esto es, la entrada para la iteración  $k+1$  es la suma de la salida más la entrada de la iteración  $k$ . Se escogió la regla de activación de Kosko con memoria propia porque, a diferencia de la regla de activación estándar de Kosko, tiene en cuenta el estado previo del nodo actual y el de los otros nodos vinculados y el peso de sus conexiones (Obiedat & Samarasinghe, 2016; Pelta & Cruz Corona, 2018).

El criterio de parada se estableció como el momento en el cual se alcanzó un valor fijo, recomendado para modelar sistemas que involucran toma de decisiones (Tsadiras, 2008). En la Figura 2-7 se muestran los resultados del proceso de inferencia del modelo de mapa cognitivo difuso de SCQM (FCM-SCQM), donde se evidencia la rápida convergencia de las variables del modelo a su valor estable final.





**Figura 2-7.** Resultados del proceso de inferencia del modelo FCM- SCQM

El análisis de convergencia permitió identificar tres rangos de toma de decisiones para la priorización de las variables de SCQM. El primer rango contiene las variables con valores finales más altos: (i) rechazos y devoluciones, y, (ii) producto defectuoso en producción. El segundo rango comprende (i) satisfacción de empleados, (ii) desarrollo de proveedores, (iii) emisiones, efluentes y desperdicios, y, (iv) OTIF. El tercer rango comprende (i) rentabilidad de los activos, (ii) costos de calidad, y, (iii) costos logísticos. Los resultados obtenidos con la simulación y el análisis de convergencia del proceso de inferencia permitieron validar la selección inicial de las variables de SCQM del modelo y los valores de sus interrelaciones.

### 2.4.3 Modelo multi-etapa de SCQM usando mapas cognitivos difusos

El siguiente desarrollo de la investigación estuvo orientado a la integración de técnicas de modelado multi-etapa que permitieran abordar el problema de SCQM considerando las particularidades de las etapas principales de la cadena de suministro (abastecimiento, fabricación y distribución). Así, se consideraron los mapas cognitivos difusos multi-capas (*Multi-Layer Fuzzy Cognitive Map*), dado que estos permiten descomponer el problema o mapa principal de la capa 1 (SCQM, en este caso) en tres submapas (abastecimiento, fabricación y distribución, en este caso) en una segunda capa que expande los conceptos de interés del mapa principal

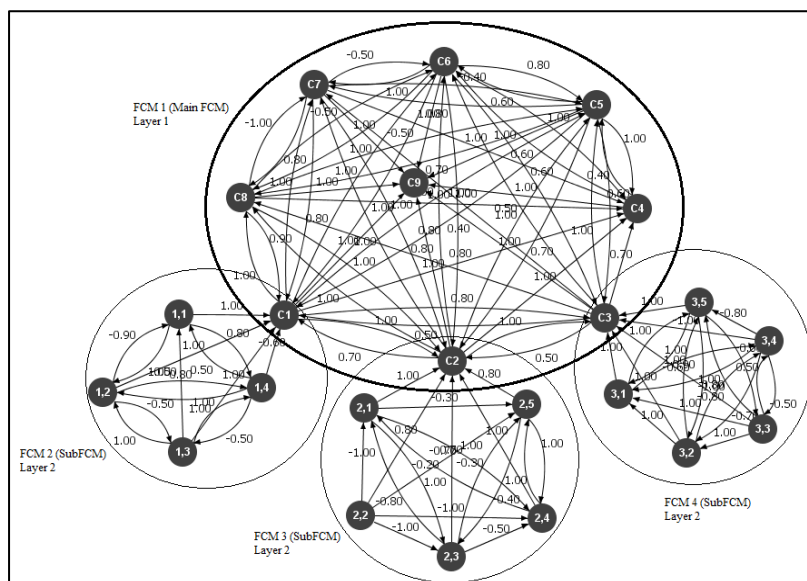
Se desarrolló un modelo de SCQM usando un mapa cognitivo difuso multi-capa (ML-FCM), el cual expande y descompone los conceptos de SCQM (ver Anexo D), agrupándolos como mapas cognitivos difusos que representan las tres etapas de la cadena de suministro (Cogollo & Correa, 2019). En la Tabla 2-1 se muestran las capas, mapas y conceptos del modelo. La capa 1 corresponde al FCM 1 con los conceptos que representan el desempeño de SCQM, los cuales fueron seleccionados teniendo como referencia trabajos previos (Cheung & Leung, 2000; Gao et al., 2016; Lou et al., 2009; Modak et al., 2016; Pang & Tan, 2018; Tsai & Wang, 2004; Xiao et al., 2011; Yan et al., 2010). Los conceptos de FCM 2 representan el desempeño de abastecimiento, los de FCM 3 representan el desempeño en fabricación y, los de FCM 4, el desempeño en distribución.

**Tabla 2-1.** Capas, mapas y variables del modelo SCQM.

Layer	# FCM	ID	Concepts
Layer 1	FCM 1 (Main FCM)	C1	Suppliers performance
		C2	Manufacturer performance
		C3	Distribution performance
		C4	Total profit (%)
		C5	Customer satisfaction (%)
		C6	Suppliers Development (%)
		C7	Total Logistics costs (%)
		C8	Quality Costs (%)
		C9	SCQM Performance (central concept)
Layer 2	FCM 2 (SubFCM)	C1	Suppliers performance (central concept)
		1.1	Suppliers perfect orders (%)
		1.2	Suppliers rejections and Returns (%)
		1.3	Suppliers fill rate (%)
		1.4	Ordering cost (\$)
	FCM 3 (SubFCM)	C2	Manufact. performance (central concept)
		2.1	Manufacturing unit cost (\$/unit)
		2.2	Defective product in production (%)
		2.3	Emissions, effluent and waste (%)
		2.4	Productivity (%)
	FCM 4 (SubFCM)	2.5	Fill rate (%)
		C3	Distrib. performance (central concept)
		3.1	Customer perfect deliveries (%)
		3.2	OTIF (%)
		3.3	Distribution lead time (hours)
3.4	Customer rejections and Returns (%)		
3.5	Distribution unit cost (\$/unit)		

Los pesos de las relaciones causales entre los conceptos al interior de cada mapa se cuantificaron a partir de matrices de correlación de análisis de datos históricos. Las matrices de adyacencia resultantes sirvieron de insumo para la construcción del modelo

resultante (Figura 2-8). Se realizó el análisis de la construcción del modelo a través del cálculo de los indicadores de densidad y fortaleza. La densidad es la relación entre el número de arcos en el marco y el número máximo de arcos posibles. La fortaleza se refiere a la significancia de cada concepto y se mide como la sumatoria de los pesos entrantes y salientes en cada nodo en valores absolutos. Los valores de densidad de los mapas están en el rango entre 0.63 el mínimo y 0.79 el máximo, por lo que se puede afirmar que el modelo desarrollado es una estructura de complejidad alta.

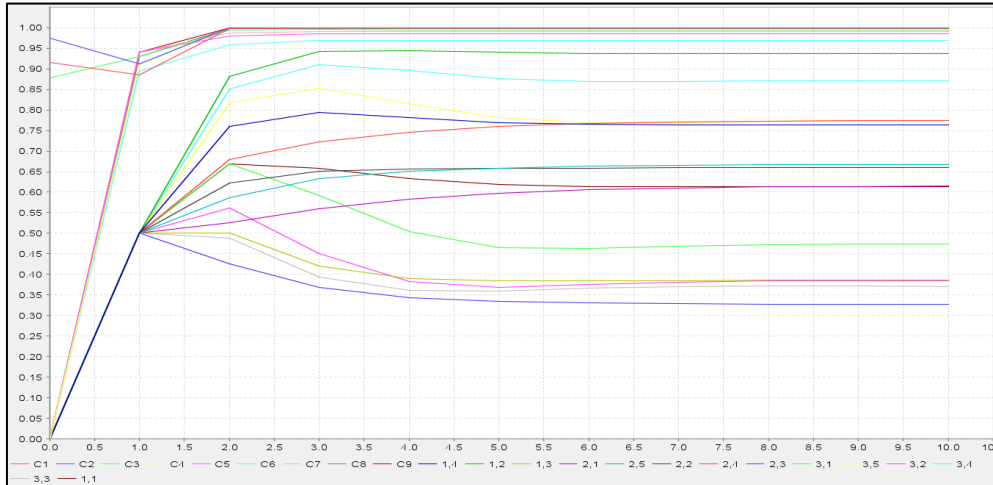


**Figura 2-8.** Modelo multi-etapa de SCQM (ML-FCM-SCQM)

Los resultados de los valores de fortaleza de los mapas permitieron determinar los conceptos de ordenes perfectos de proveedores y rechazos y devoluciones a proveedores como los de mayor significancia en la etapa de abastecimiento. En la etapa de fabricación resultaron de mayor significancia el costo unitario de fabricación y la productividad. En la etapa de distribución, los de mayor significancia son rechazos y devoluciones de clientes y el costo unitario de distribución.

En cuanto al comportamiento dinámico del modelo, el proceso de inferencia y simulación se llevó a cabo usando un enfoque ascendente, esto es, de la capa 2 a la capa 1. Primero, se lleva a cabo, independientemente, la inferencia en los subgrafos de la capa 2 y, después, en la capa 1, usando los puntos de equilibrio de la capa 2 como los niveles de

activación de los conceptos de transferencia entre capas. En la Figura 2-9 se muestra un ejemplo del resultado gráfico del proceso de inferencia, evidenciando la rápida convergencia de los conceptos.



**Figura 2-9.** Resultados del proceso de inferencia del modelo ML-FCM-SCQM.

## 2.5 Conclusión

En este capítulo se mostraron elementos que, en su conjunto, contribuyeron al logro pleno del segundo objetivo específico de la investigación: determinar los elementos de un modelo analítico para la coordinación e integración de la gestión de la calidad en el contexto de las cadenas de suministro. Inicialmente, se presentaron las etapas del diseño metodológico secuencial exploratorio utilizado. En este, a partir de los resultados de la fase exploratoria del capítulo 1, se determinaron y sustentaron los elementos necesarios para aplicar el enfoque del modelado analítico en el sistema estudiado.

Dado que un aspecto diferenciador de la investigación es superar el enfoque descriptivo característico de la mayoría de los modelos propuestos hasta el momento para la gestión de la calidad en cadenas de suministro, se definió el uso de la técnica de modelado de mapas cognitivos grises difusos. Estos permiten modelar sistemas complejos o poco estudiados desde una perspectiva de análisis de los impactos de las relaciones entre variables.

Otro elemento fundamental en el desarrollo de modelos es la selección de la técnica de validación del desempeño dinámico. Debido a que el propósito del enfoque de modelado usado en esta investigación se basa en el análisis del impacto de la relaciones entre factores y que se tiene un número relativamente elevado de ellos ( $k \geq 5$ ), la literatura sobre diseño experimental recomienda la aplicación de diseños factoriales fraccionados (Gutiérrez & De La Vara, 2012; Montgomery, 2017). Además del sustento teórico de la literatura sobre diseño de experimentos, se verificaron trabajos previos de modelado de sistemas donde se utilizaron diseños factoriales fraccionados para la validación del modelo vía simulación con experimentos computacionales.

El desarrollo de este capítulo también permitió el fortalecimiento de las capacidades investigativas en el área de modelado analítico de la gestión de la calidad en cadenas de suministro. Esto se evidenció en las tres publicaciones realizadas en memorias de congreso internacionales. El primer trabajo socializado consistió en el desarrollo de un modelo basado en reglas para la medición del desempeño de la gestión de la calidad en cadenas de suministro bajo un enfoque de sostenibilidad, aplicando la teoría de conjuntos difusos para el tratamiento de la incertidumbre.

El segundo trabajo consistió en el desarrollo de un modelo para la integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro usando mapas cognitivos difusos, Aquí se probó el adecuado funcionamiento de esta herramienta para modelar el problema de interés. El tercer trabajo permitió alcanzar un peldaño más cercano al objetivo principal de la investigación, dado que se desarrolló un modelo multi-etapa de la gestión de la calidad en cadenas de suministro usando mapas cognitivos difusos. Todos estos elementos metodológicos, teóricos y de producción académica permiten evidenciar un abordaje y apropiación plena del constructo de modelado analítico de la gestión de la calidad en cadenas de suministro usando técnicas multi-etapas.



### **3. Modelo analítico multi-etapas de la gestión de calidad en cadenas de suministro**

La construcción de modelos de sistemas complejos o poco estudiados se torna particularmente difícil debido al poco conocimiento que se tiene de sus propiedades únicas y de la interacción de sus componentes. Es aún más difícil obtener un conjunto razonable de reglas microscópicas que puedan explicar las propiedades macroscópicas del sistema (Hatwagner, Buruzs, Torma, & Koczy, 2015; Nagar & Jain, 2008).

Para afrontar este reto de sistemas complejos o poco conocidos, se recomienda el uso de modelado y simulación como métodos prácticos y razonables (Law, 2015). Para ello, se construye un modelo propio con reglas microscópicas construidas a partir de referentes exploratorios para luego obtener el comportamiento macroscópico que surge de dichas reglas. Se logra así desarrollar experiencias simuladas interactivas e intuitivas de diversas dinámicas que ayudan a obtener conclusiones sobre las interacciones de las variables del sistema (Laguna & Marklund, 2019).

El desarrollo del modelo analítico multi-etapas para la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro se enmarca en el contexto descrito previamente: un sistema poco estudiado desde el enfoque del modelado basado en reglas. Por ello, en el proceso de construcción de este modelo se partió de las preguntas orientadoras propuestas por Sayama (2015):

**a)** ¿Cuál es la pregunta clave que se desea abordar?

Respuesta: ¿Cuáles son los factores importantes de un modelo que representa la gestión de la calidad en cadenas de suministro, bajo un enfoque multi-etapa?

**b)** ¿A qué escala se debe describir el comportamiento del sistema?

Respuesta: se debe describir el comportamiento de las variables del sistema a nivel microscópico, a través de la fortaleza de sus interrelaciones.

**c)** ¿Cómo está estructurado el sistema?

Respuesta: el sistema está estructurado en variables y arcos dirigidos del peso de sus interrelaciones, agrupados en mapas cognitivos. Estos mapas, a su vez, se agrupan en capas que se unen a través de variables de transferencia.

**d)** ¿Cuáles son los posibles estados del sistema?

Respuesta: el sistema puede tener tres comportamientos: converger a un punto fijo, un comportamiento cíclico o un comportamiento caótico. Es recomendable que el sistema converja a un punto fijo.

**e)** ¿Cómo cambia el estado del sistema con el tiempo?

Respuesta: los vectores de estado de las variables cambian con el tiempo siguiendo la regla de activación de Kosko con memoria propia, siguiendo una función de transferencia sigmoideal.

Luego, teniendo como referente estas definiciones conceptuales sobre el proceso de modelado y simulación, se establecieron las etapas propias de construcción del modelo: (i) Selección de variables, (ii) Determinación de relaciones causales, (iii) Construcción del modelo, (iv) Análisis de la estructura del modelo, y, (v) Validación del desempeño del modelo. Los resultados se muestran a continuación.

### **3.1 Selección de variables del modelo**

La selección de las variables de estado y variables respuesta que representan la gestión de la calidad en cada una de las etapas se realizó teniendo como referente la revisión del estado del arte realizada (Cogollo-Flórez & Correa-Espinal, 2019), así como otros autores que se detallan en cada caso. Las variables están agrupadas por etapas de la cadena de suministro y en la capa principal de SCQM (Tablas 3-1 a 3-4). También, en la Tabla 3-5 se muestra el agrupamiento de estas variables por capa y con la codificación asignada.



**Tabla 3-1.** Descripción de variables de la etapa de abastecimiento.

Tipo de variable	Nombre	Definición	Referencia
Respuesta/ dependiente	Desempeño en etapa de abastecimiento	Representa el nivel de desempeño en calidad de la etapa de abastecimiento, producto de la influencia e interacción de las variables de estado respectivas.	(Foster, 2017; Lin, Chow, Madu, Kuei, & Pei Yu, 2005)
Estado/ independiente	Ordenes perfectas de proveedores (%)	Sirve para la evaluación y el seguimiento de los proveedores en cuanto al cumplimiento de las condiciones de negociación pactadas de tiempos, calidad de producto, condiciones de entrega e información completa.	(Amer, Luong, & Lee, 2010; Luthra, Govindan, Kannan, Mangla, & Garg, 2017)
	Rechazos y devoluciones a proveedores (%)	Reflejan incumplimiento por parte del proveedor de las especificaciones pactadas en la negociación y ocasionan reprocesos y retrasos en las operaciones producto del retorno de mercancía al proveedor.	(Foster, 2017; Li & Jiang, 2019)
	<i>Fill Rate</i> en abastecimiento (%)	Mide el porcentaje de cumplimiento en la entrega con respecto al total de los artículos solicitados al proveedor y tiene una relación estrecha con el nivel de servicio del proveedor.	(Coyle et al., 2017)
	Costo de ordenar (\$)	Costo de emitir una orden de compra, incluye costos administrativos, de comunicación o costos fijos relacionados.	(Chopra, 2018)

**Tabla 3-2.** Descripción de variables de la etapa de fabricación.

Tipo de variable	Nombre	Definición	Referencia
Respuesta/ dependiente	Desempeño en etapa de fabricación	Representa el nivel de desempeño en calidad de la etapa de fabricación, producto de la influencia e interacción de las variables de estado respectivas.	(Phan, Abdallah, & Matsui, 2011)
Estado/ independiente	Costo unitario de fabricación (\$/unidad)	Costo promedio de una unidad fabricada. Incluye costos fijos y variables involucrados. Indicador de competitividad a un nivel de calidad homogéneo del mercado.	(Phan et al., 2011; Zeng, Phan, & Matsui, 2013)
	Producto defectuoso en fabricación (%)	Indicador de rendimiento en calidad de fabricación de la capacidad del proceso para cumplir eficientemente con las especificaciones de diseño. Impacta también el compromiso ambiental de uso adecuado de recursos.	(Jacobs & Chase, 2018; Rashid & Aslam, 2012)
	Emissiones, efluentes y desperdicios (%)	Porcentaje de emisiones, efluentes y desperdicios con respecto al total de materiales e insumos utilizados en fabricación.	(Brandenburg, Govindan, Sarkis, & Seuring, 2014; Chardine-Baumann & Botta-Genoulaz, 2014)
	<i>Fill Rate</i> en fabricación (%)	Mide la capacidad de respuesta de una organización en términos de entrega de pedidos completos al cliente, comparando las unidades pedidas con las entregadas.	(Kleijnen & Smits, 2003; Phan et al., 2011)

**Tabla 3-3.** Descripción de variables de la etapa de distribución.

Tipo de variable	Nombre	Definición	Referencia
Respuesta/ dependiente	Desempeño en etapa de distribución	Representa el nivel de desempeño en calidad de la etapa de distribución, producto de la influencia e interacción de las variables de estado respectivas.	(Kleijnen & Smits, 2003)
Estado/ independiente	Entregas perfectas al cliente (%)	Indicador de calidad en la etapa de distribución. Mide el porcentaje de pedidos que la empresa entrega a tiempo, completos, en buen estado y sin problemas de documentación.	(Jacobs & Chase, 2018; Slack et al., 2016)
	Rechazos y devoluciones de clientes (%)	Mide el porcentaje de artículos no aceptados por el cliente al momento de la entrega por el incumplimiento de uno o varios requisitos pactados. Las devoluciones corresponden a los artículos retornados al fabricante o distribuidor por incumplimiento de algún requisito, luego de haber sido recibidos por el cliente.	(Flynn & Zhao, 2015; Yao & Zhang, 2009)
	Costo unitario de distribución (\$/unidad)	Corresponde al costo por unidad de peso o volumen transportado desde las plantas de producción hasta el consumidor final. Depende de las distancias y condiciones particulares de transporte requeridas por cada producto.	(Kleijnen & Smits, 2003)

**Tabla 3-4.** Descripción de variables de SCQM (mapa principal).

Tipo de variable	Nombre	Definición	Referencia
Respuesta/ dependiente	Desempeño de SCQM	Representa el nivel de desempeño global en SCQM, producto de la influencia e interacción de las variables de estado respectivas.	(Foster, 2008; Robinson & Malhotra, 2005)
Estado/ independiente	Desempeño en etapa de abastecimiento	Representa el nivel de desempeño en calidad de la etapa de abastecimiento, producto de la influencia e interacción de las variables de estado respectivas.	(Foster, 2017; Lin et al., 2005)
	Desempeño en etapa de fabricación	Representa el nivel de desempeño en calidad de la etapa de fabricación, producto de la influencia e interacción de las variables de estado respectivas.	(Phan et al., 2011)
	Desempeño en etapa de distribución	Representa el nivel de desempeño en calidad de la etapa de distribución, producto de la influencia e interacción de las variables de estado respectivas.	(Kleijnen & Smits, 2003)
	Costos logísticos totales (%)	Sumatoria de los costos incurridos para la ejecución de actividades propias del ciclo logístico desde proveedores hasta el cliente final.	(Chopra, 2018; Hugos, 2018; J. Kleijnen & Smits, 2003)
	Costos de calidad (%)	Costos incurridos para el desarrollo de la función de calidad a lo largo de la cadena de suministro. Incluye costos de prevención, corrección, fallas internas y externas.	(Flynn & Zhao, 2015; Maruchek, Greis, Mena, & Cai, 2011; Sharma, Garg, & Agarwal, 2012; Steven, Dong, & Corsi, 2014)

**Tabla 3-5.** Capas, etapas y variables del modelo.

Capa	Etapas	# FGCM	ID	Variables
Capa 1	SCQM	FGCM 1 (Principal)	C1	Desempeño en etapa de abastecimiento
			C2	Desempeño en etapa de fabricación
			C3	Desempeño en etapa de distribución
			C4	Costos logísticos totales (%)
			C5	Costos de calidad (%)
			C6	Desempeño de SCQM
Capa 2	Abastecimiento	FGCM 2 (SubFGCM)	C1	Desempeño en etapa de abastecimiento
			C1,1	Ordenes perfectas de proveedores (%)
			C1,2	Rechazos y devoluciones a proveedores (%)
			C1,3	Fill Rate en abastecimiento (%)
			C1,4	Costo de ordenar (\$)
	Fabricación	FGCM 3 (SubFGCM)	C2	Desempeño en etapa de fabricación
			C2,1	Costo unitario de fabricación (\$/unidad)
			C2,2	Producto defectuoso en fabricación (%)
			C2,3	Emissiones, efluentes y desperdicios (%)
			C2,4	Fill Rate en fabricación (%)
	Distribución	FGCM 4 (SubFGCM)	C3	Desempeño en etapa de distribución
			C3,1	Entregas perfectas al cliente (%)
			C3,2	Rechazos y devoluciones de clientes (%)
			C3,3	Costo unitario de distribución (\$/unidad)

### 3.2 Determinación de relaciones causales

En las Tablas 3-6 a 3-9 se muestran las interrelaciones de las variables en cada mapa, utilizando la codificación definida previamente. Dado que es necesario validar la fortaleza de estas interrelaciones, no se les asigna un valor concreto a su peso ( $w$ ), sino un valor gris que, adicionalmente, incorpora la incertidumbre propia de la gestión de la calidad en cadenas de suministro.

**Tabla 3-6.** Interrelaciones de variables del FGCM 2 (etapa de abastecimiento).

Variable origen ( $i$ )	Variable destino ( $j$ )	Notación de peso ( $\otimes w_{ij}$ )	Intervalo de $\otimes w_{ij}$
C1,1	C1	$\otimes w_{1,1 \rightarrow 1}$	[0.8, 1.0]
C1,2	C1	$\otimes w_{1,2 \rightarrow 1}$	[-1.0, -0.8]
C1,3	C1	$\otimes w_{1,3 \rightarrow 1}$	[0.8, 1.0]
C1,4	C1	$\otimes w_{1,4 \rightarrow 1}$	[-0.6, -0.4]
C1,1	C1,2	$\otimes w_{1,1 \rightarrow 1,2}$	[-1.0, -0.8]
C1,1	C1,4	$\otimes w_{1,1 \rightarrow 1,4}$	[-1.0, -0.9]
C1,2	C1,3	$\otimes w_{1,2 \rightarrow 1,3}$	[-0.6, -0.4]
C1,2	C1,4	$\otimes w_{1,2 \rightarrow 1,4}$	[-0.6, -0.4]
C1,3	C1,4	$\otimes w_{1,3 \rightarrow 1,4}$	[-1.0, -0.9]

**Tabla 3-7.** Interrelaciones de variables del FGCM 3 (etapa de fabricación).

Variable origen (i)	Variable destino (j)	Notación de peso ( $\otimes w_{ij}$ )	Intervalo de $\otimes w_{ij}$
C2,1	C2	$\otimes w_{2,1 \rightarrow 2}$	[-1.0, -0.8]
C2,2	C2	$\otimes w_{2,2 \rightarrow 2}$	[-0.9, -0.7]
C2,3	C2	$\otimes w_{2,3 \rightarrow 2}$	[-0.8, -0.6]
C2,4	C2	$\otimes w_{2,4 \rightarrow 2}$	[0.7, 0.9]
C2,1	C2,3	$\otimes w_{2,1 \rightarrow 2,3}$	[-0.3, -0.1]
C2,1	C2,4	$\otimes w_{2,1 \rightarrow 2,4}$	[-0.4, -0.2]
C2,2	C2,3	$\otimes w_{2,2 \rightarrow 2,3}$	[-1.0, -0.8]
C2,2	C2,4	$\otimes w_{2,2 \rightarrow 2,4}$	[-0.8, -0.6]
C2,3	C2,4	$\otimes w_{2,3 \rightarrow 2,4}$	[-0.4, -0.2]
C2,2	C2,1	$\otimes w_{2,2 \rightarrow 2,1}$	[0.8, 1.0]
C2,3	C2,1	$\otimes w_{2,3 \rightarrow 2,1}$	[0.7, 0.9]
C2,4	C2,3	$\otimes w_{2,4 \rightarrow 2,3}$	[-0.5, -0.3]

**Tabla 3-8.** Interrelaciones de variables del FGCM 4 (etapa de distribución).

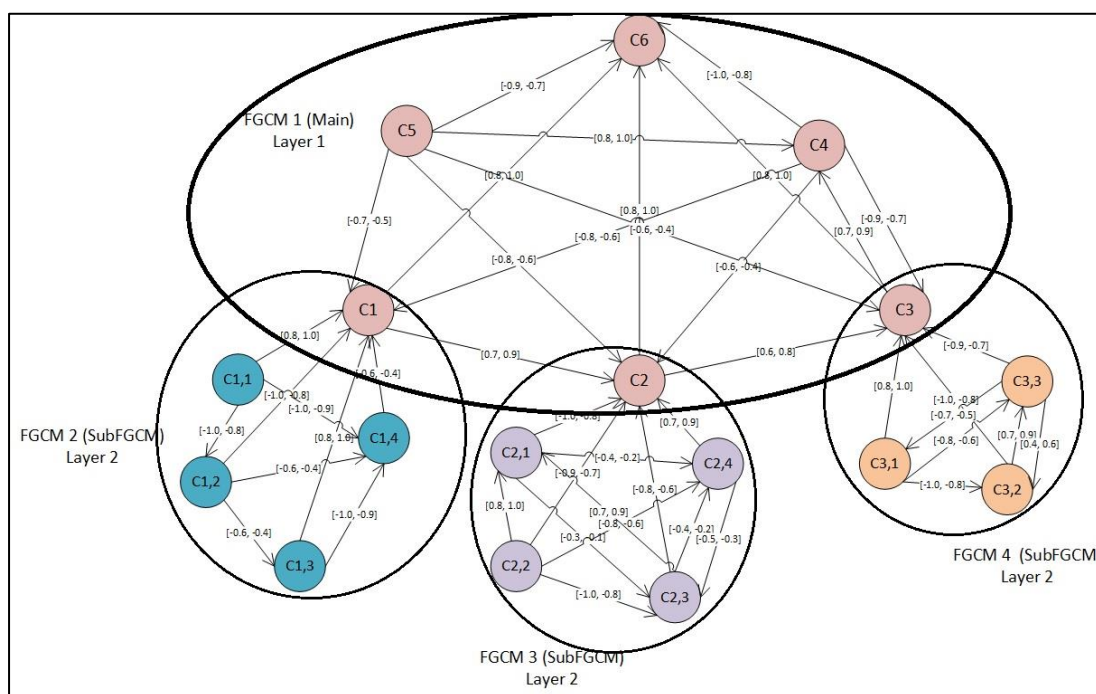
Variable origen (i)	Variable destino (j)	Notación de peso ( $\otimes w_{ij}$ )	Intervalo de $\otimes w_{ij}$
C3,1	C3	$\otimes w_{3,1 \rightarrow 3}$	[0.8, 1.0]
C3,2	C3	$\otimes w_{3,2 \rightarrow 3}$	[-1.0, -0.8]
C3,3	C3	$\otimes w_{3,3 \rightarrow 3}$	[-0.9, -0.7]
C3,1	C3,2	$\otimes w_{3,1 \rightarrow 3,2}$	[-1.0, -0.8]
C3,1	C3,3	$\otimes w_{3,1 \rightarrow 3,3}$	[-0.8, -0.6]
C3,2	C3,3	$\otimes w_{3,2 \rightarrow 3,3}$	[0.7, -0.9]
C3,3	C3,1	$\otimes w_{3,3 \rightarrow 3,1}$	[-0.7, -0.5]
C3,3	C3,2	$\otimes w_{3,3 \rightarrow 3,2}$	[0.4, 0.6]

**Tabla 3-9.** Interrelaciones de variables del FGCM 1 (SCQM).

Variable origen (i)	Variable destino (j)	Notación de peso ( $\otimes w_{ij}$ )	Intervalo de $\otimes w_{ij}$
C1	C6	$\otimes w_{1 \rightarrow 6}$	[0.8, 1.0]
C2	C6	$\otimes w_{2 \rightarrow 6}$	[0.8, 1.0]
C3	C6	$\otimes w_{3 \rightarrow 6}$	[0.8, 1.0]
C4	C6	$\otimes w_{4 \rightarrow 6}$	[-1.0, -0.8]
C5	C6	$\otimes w_{5 \rightarrow 6}$	[-0.9, -0.7]
C1	C2	$\otimes w_{1 \rightarrow 2}$	[0.7, 0.9]
C2	C3	$\otimes w_{2 \rightarrow 3}$	[0.6, 0.8]
C4	C5	$\otimes w_{4 \rightarrow 5}$	[0.7, 0.9]
C4	C1	$\otimes w_{4 \rightarrow 1}$	[-0.8, -0.6]
C4	C2	$\otimes w_{4 \rightarrow 2}$	[-0.6, -0.4]
C4	C3	$\otimes w_{4 \rightarrow 3}$	[-0.9, -0.7]
C5	C1	$\otimes w_{5 \rightarrow 1}$	[-0.7, -0.5]
C5	C2	$\otimes w_{5 \rightarrow 2}$	[-0.8, -0.6]
C5	C3	$\otimes w_{5 \rightarrow 3}$	[-0.6, -0.4]
C5	C4	$\otimes w_{5 \rightarrow 4}$	[0.8, 1.0]

### 3.3 Construcción del modelo ML-FGCM-SCQM

La construcción del modelo multi-etapa de gestión de la calidad en cadenas de suministro usando mapas grises difusos (ML-FGCM-SCQM) se llevó a cabo combinando la información de las Tablas 3-6 a 3-9 y configurándolas en la estructura de ML-FGCM resultante en la Figura 3-1. La capa 1 contiene al mapa principal (FGCM 1) con las variables que representan SCQM. La capa 2 tiene 3 submapas que corresponden a las 3 etapas de la cadena de suministro: abastecimiento (FGCM 2), fabricación (FGCM 3) y distribución (FGCM 4). La conexión entre las capas 1 y 2 se da a través de los conceptos de transferencia que son ampliados en la capa 2: C1-desempeño en abastecimiento, C2-desempeño en fabricación y C3-desempeño en distribución.



**Figura 3-1.** Modelo de mapa cognitivo gris difuso multi-etapa de la gestión de la calidad en cadenas de suministro (ML-FGCM-SCQM).

### 3.4 Análisis de la estructura del modelo

El análisis estructural del modelo desarrollado permite describir sus propiedades estáticas y evaluar la fortaleza de los conceptos para representar el sistema estudiado. Este análisis

se lleva acabo calculando los índices de densidad de cada mapa. La densidad es la relación entre el número de arcos en el FGCM ( $|E|$ ) y el número máximo de arcos posible:

$$Densidad = \frac{|E|}{n(n-1)} \quad (3.1)$$

donde  $n$  es el número de conceptos (nodos) en cada mapa.

En la Tabla 3-10 se muestran los resultados de los índices de densidad de cada mapa. Los índices de densidad fluctúan entre 0.45 para el FGCM 2 y 0.67 para el FGCM 4, con un promedio de 0.55, lo cual los ubica en un rango de complejidad media-alta, por lo que es posible afirmar que el modelo desarrollado es una estructura compleja en cuanto a la configuración de los conceptos y sus interrelaciones. Este resultado del análisis de complejidad estructural del modelo no está correlacionado con su comportamiento dinámico en el proceso de inferencia, pero, valida el establecimiento del número de relaciones entre conceptos.

**Tabla 3-10.** Índices de densidad del modelo ML-FGCM-SCQM

Capa	FGCM	Nodos	Arcos	Densidad
1	1	6	15	0.50
2	2	5	9	0.45
	3	5	12	0.60
	4	4	8	0.67

### 3.5 Validación del desempeño del modelo

La validación del desempeño dinámico del modelo se realizó usando un diseño factorial fraccionado para la ejecución del proceso de inferencia de cada submapa en las dos capas. La integración del diseño experimental en el proceso de simulación se llevó a cabo basándose en los pasos propuestos por Lorscheid *et al.* (2012): (i) Definición del objetivo del experimento de simulación, (ii) Clasificación y definición de variables y factores, (iii) Selección del diseño factorial fraccionado, (iv) Ejecución del experimento de simulación, y, (v) Análisis de efectos.

### 3.5.1 Objetivo del experimento de simulación

La definición del objetivo del experimento es la base para determinar la ruta de análisis de los resultados de la simulación. En este trabajo, el objetivo de los experimentos es determinar los factores importantes y sus efectos sobre la variable respuesta en cada mapa del modelo ML-FGCM-SCQM. Esto permitirá confirmar o no la selección de conceptos y sus interrelaciones, así como el uso de intervalos o números concretos para los pesos de las interrelaciones.

### 3.5.2 Clasificación y definición de variables y factores

La clasificación y definición de variables y factores está determinada por lo definido en el numeral 3.2 para la construcción del modelo. En este caso, los factores de interés son las interrelaciones entre conceptos. Los niveles bajo y alto de los factores corresponden a los valores mínimo y máximo del número gris respectivo. En las Tablas 3-11 a 3-14 se muestran los factores, niveles y variable respuesta de capa mapa.

**Tabla 3-11.** Factores y niveles del experimento en FGCM 2.

<b>Factor</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel alto</b>
C1,1→C1	0.8	1.0
C1,2→C1	-1.0	-0.8
C1,3→C1	0.8	1.0
C1,4→C1	-0.6	-0.4
C1,1→C1,2	-1.0	-0.8
C1,1→C1,4	-1.0	-0.9
C1,2→C1,3	-0.6	-0.4
C1,2→C1,4	-0.6	-0.4
C1,3→C1,4	-1.0	-0.9
<b>Variable respuesta:</b>	C1 (Desempeño en etapa de abastecimiento)	

**Tabla 3-12.** Factores y niveles del experimento en FGCM 3.

<b>Factor</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel alto</b>
C2,1→C2	-1.0	-0.8
C2,2→C2	-0.9	-0.7
C2,3→C2	-0.8	-0.6
C2,4→C2	0.7	0.9
C2,1→C2,3	-0.3	-0.1
C2,1→C2,4	-0.4	-0.2
C2,2→C2,3	-1.0	-0.8
C2,2→C2,4	-0.8	-0.6
C2,3→C2,4	-0.4	-0.2
C2,2→C2,1	0.8	1.0
C2,3→C2,1	0.7	0.9
C2,4→C2,3	-0.5	-0.3
<b>Variable respuesta:</b>	C2 (Desempeño en etapa de fabricación)	

**Tabla 3-13.** Factores y niveles del experimento en FGCM 4.

<b>Factor</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel alto</b>
C3,1→C3	0.8	1.0
C3,2→C3	-1.0	-0.8
C3,3→C3	-0.9	-0.7
C3,1→C3,2	-1.0	-0.8
C3,1→C3,3	-0.8	-0.6
C3,2→C3,3	0.7	0.9
C3,3→C3,1	-0.7	-0.5
C3,3→C3,2	0.4	0.6
<b>Variable respuesta:</b>	C3 (Desempeño en etapa de distribución)	

**Tabla 3-14.** Factores y niveles del experimento en FGCM 1.

<b>Factor</b>	<b>Nivel bajo</b>	<b>Nivel alto</b>
C1→C6	0.8	1.0
C2→C6	0.8	1.0
C3→C6	0.8	1.0
C4→C6	-1.0	-0.8
C5→C6	-0.9	-0.7
C1→C2	0.7	0.9
C2→C3	0.6	0.8
C4→C5	0.7	0.9
C4→C1	-0.8	-0.6
C4→C2	-0.6	-0.4
C4→C3	-0.9	-0.7
C5→C1	-0.7	-0.5
C5→C2	-0.8	-0.6
C5→C3	-0.6	-0.4
C5→C4	0.8	1.0
<b>Variable respuesta:</b>	C6 (Desempeño de SCQM)	

### 3.5.3 Selección del diseño factorial fraccionado

La selección del diseño factorial fraccionado apropiado en cada mapa, se realizó considerando el número de factores de cada experimento y la obtención de una alta resolución alta (IV o V) para evitar confusión de efectos principales con interacciones dobles o triples, con un número de corridas aceptable (Tabla 3-15).

**Tabla 3-15.** Tipos de diseño factorial fraccionado seleccionados.

<b>Capa</b>	<b>Etapa</b>	<b># FGCM</b>	<b>Número de factores</b>	<b>Diseño factorial fraccionado</b>	<b>Resolución</b>	<b>Número de corridas</b>
Capa 1	SCQM	FGCM 1 (Principal)	15	$2^{15-9}$	IV	64
Capa 2	Abastecimiento	FGCM 2 (SubFGCM)	9	$2^{9-4}$	IV	32
	Fabricación	FGCM 3 (SubFGCM)	12	$2^{12-7}$	IV	32
	Distribución	FGCM 4 (SubFGCM)	8	$2^{8-2}$	V	64



### 3.5.4 Ejecución del experimento de simulación

La ejecución del experimento de simulación se llevó a cabo siguiendo el enfoque ascendente y la función de activación de Kosko con memoria propia, que demostraron su adecuado desempeño en trabajos previos (Christoforou & Andreou, 2017; Cogollo & Correa, 2019). En las tablas 3-16 a 3-19 se muestran los arreglos experimentales con las corridas y los niveles de los factores y el resultado de la variable respuesta en cada una de ellas. Las simulaciones se ejecutaron en el software FCM Expert®.

**Tabla 3-16.** Resultados de simulación de etapa de abastecimiento para el diseño factorial fraccionado  $2^{9-4}$

Corrida	C1,1→ C1	C1,2→ C1	C1,3→ C1	C1,4→ C1	C1,1→ C1,2	C1,1→ C1,4	C1,2→ C1,3	C1,2→ C1,4	C1,3→ C1,4	Valor C1 (Desemp. Abast.)
1	1	-0.8	0.8	-0.6	-0.8	-0.9	-0.4	-0.6	-1	0.8328
2	1	-0.8	1	-0.4	-1	-1	-0.6	-0.6	-1	0.8595
3	0.8	-0.8	1	-0.6	-0.8	-1	-0.4	-0.4	-1	0.8267
4	1	-0.8	0.8	-0.4	-1	-0.9	-0.4	-0.6	-0.9	0.8453
5	1	-1	1	-0.6	-1	-1	-0.4	-0.6	-0.9	0.8462
6	0.8	-1	1	-0.6	-1	-1	-0.6	-0.4	-1	0.8145
7	0.8	-1	0.8	-0.6	-0.8	-1	-0.6	-0.6	-1	0.7831
8	0.8	-1	0.8	-0.4	-0.8	-0.9	-0.4	-0.4	-1	0.7945
9	0.8	-0.8	1	-0.4	-1	-1	-0.4	-0.4	-0.9	0.8401
10	0.8	-0.8	0.8	-0.6	-0.8	-0.9	-0.6	-0.4	-0.9	0.7959
11	1	-1	0.8	-0.4	-0.8	-0.9	-0.6	-0.6	-0.9	0.8178
12	1	-0.8	1	-0.6	-1	-0.9	-0.4	-0.4	-1	0.8563
13	0.8	-0.8	1	-0.6	-1	-0.9	-0.6	-0.6	-0.9	0.8275
14	0.8	-0.8	1	-0.4	-0.8	-0.9	-0.6	-0.6	-1	0.8275
15	1	-1	0.8	-0.4	-1	-1	-0.4	-0.4	-1	0.8333
16	0.8	-1	1	-0.4	-1	-0.9	-0.4	-0.6	-1	0.8278
17	1	-1	1	-0.6	-0.8	-0.9	-0.6	-0.4	-1	0.8291
18	0.8	-0.8	0.8	-0.4	-1	-0.9	-0.6	-0.4	-1	0.8148
19	0.8	-0.8	0.8	-0.6	-1	-1	-0.4	-0.6	-1	0.8153
20	1	-1	1	-0.4	-1	-0.9	-0.6	-0.4	-0.9	0.8451
21	0.8	-0.8	0.8	-0.4	-0.8	-1	-0.4	-0.6	-0.9	0.8134
22	1	-0.8	0.8	-0.4	-0.8	-1	-0.6	-0.4	-1	0.8339
23	1	-0.8	1	-0.6	-0.8	-1	-0.6	-0.6	-0.9	0.8458
24	0.8	-1	0.8	-0.4	-1	-1	-0.6	-0.6	-0.9	0.8013
25	0.8	-1	1	-0.4	-0.8	-1	-0.6	-0.4	-0.9	0.8104
26	1	-1	0.8	-0.6	-1	-0.9	-0.6	-0.6	-1	0.8214
27	1	-0.8	0.8	-0.6	-1	-1	-0.6	-0.4	-0.9	0.8337
28	1	-0.8	1	-0.4	-0.8	-0.9	-0.4	-0.4	-0.9	0.8553
29	0.8	-1	1	-0.6	-0.8	-0.9	-0.4	-0.6	-0.9	0.8097
30	1	-1	0.8	-0.6	-0.8	-1	-0.4	-0.4	-0.9	0.8158
31	0.8	-1	0.8	-0.6	-1	-0.9	-0.4	-0.4	-0.9	0.7951
32	1	-1	1	-0.4	-0.8	-1	-0.4	-0.6	-1	0.8445

**Tabla 3-17.** Resultados de simulación de etapa de fabricación para el diseño factorial fraccionado  $2^{12-7}$

Corrida	C2,1 →C2	C2,2→ C2	C2,3→ C2	C2,4→ C2	C2,1→ C2,3	C2,1→ C2,4	C2,2→ C2,3	C2,2→ C2,4	C2,3→ C2,4	C2,2→ C2,1	C2,3→ C2,1	C2,4→ C2,3	Valor C2 (Desemp. Fabric.)
1	-0.8	-0.7	-0.6	0.7	-0.3	-0.4	-1	-0.8	-0.4	1	0.9	-0.3	0.309
2	-1	-0.7	-0.6	0.9	-0.1	-0.4	-1	-0.8	-0.4	1	0.7	-0.5	0.2779
3	-1	-0.9	-0.6	0.9	-0.1	-0.4	-1	-0.6	-0.2	1	0.9	-0.5	0.2587
4	-1	-0.9	-0.8	0.7	-0.3	-0.4	-1	-0.8	-0.4	0.8	0.7	-0.5	0.2307
5	-0.8	-0.9	-0.6	0.7	-0.1	-0.2	-1	-0.6	-0.4	0.8	0.9	-0.5	0.292
6	-0.8	-0.7	-0.6	0.7	-0.1	-0.2	-1	-0.8	-0.2	0.8	0.7	-0.5	0.3262
7	-1	-0.9	-0.6	0.7	-0.1	-0.4	-0.8	-0.8	-0.2	0.8	0.7	-0.3	0.2295
8	-0.8	-0.7	-0.8	0.9	-0.3	-0.2	-1	-0.6	-0.4	1	0.9	-0.5	0.342
9	-0.8	-0.7	-0.8	0.7	-0.3	-0.2	-0.8	-0.8	-0.4	0.8	0.7	-0.3	0.2977
10	-1	-0.7	-0.8	0.9	-0.3	-0.4	-0.8	-0.8	-0.2	1	0.7	-0.3	0.2632
11	-1	-0.7	-0.8	0.9	-0.1	-0.2	-0.8	-0.8	-0.4	0.8	0.9	-0.5	0.2649
12	-1	-0.7	-0.6	0.9	-0.3	-0.2	-1	-0.8	-0.2	0.8	0.9	-0.3	0.3051
13	-1	-0.7	-0.8	0.7	-0.1	-0.2	-1	-0.6	-0.4	1	0.7	-0.3	0.2564
14	-1	-0.7	-0.6	0.7	-0.3	-0.2	-0.8	-0.6	-0.2	1	0.7	-0.5	0.2872
15	-1	-0.7	-0.8	0.7	-0.3	-0.4	-1	-0.6	-0.2	0.8	0.9	-0.5	0.2702
16	-0.8	-0.9	-0.6	0.9	-0.3	-0.4	-0.8	-0.8	-0.2	0.8	0.9	-0.5	0.2979
17	-1	-0.9	-0.8	0.9	-0.3	-0.4	-0.8	-0.6	-0.4	1	0.9	-0.3	0.2342
18	-0.8	-0.7	-0.8	0.9	-0.1	-0.4	-1	-0.6	-0.2	0.8	0.7	-0.3	0.3195
19	-0.8	-0.9	-0.6	0.7	-0.3	-0.4	-1	-0.6	-0.2	1	0.7	-0.3	0.2885
20	-0.8	-0.9	-0.8	0.9	-0.3	-0.2	-1	-0.8	-0.2	1	0.7	-0.5	0.3011
21	-1	-0.9	-0.8	0.9	-0.1	-0.2	-0.8	-0.6	-0.2	0.8	0.7	-0.5	0.2535
22	-0.8	-0.9	-0.8	0.7	-0.1	-0.4	-0.8	-0.6	-0.4	1	0.7	-0.5	0.2519
23	-1	-0.9	-0.6	0.7	-0.3	-0.2	-0.8	-0.8	-0.4	1	0.9	-0.5	0.2406
24	-0.8	-0.9	-0.8	0.7	-0.3	-0.2	-0.8	-0.6	-0.2	0.8	0.9	-0.3	0.275
25	-1	-0.7	-0.6	0.7	-0.1	-0.4	-0.8	-0.6	-0.4	0.8	0.9	-0.3	0.2585
26	-0.8	-0.7	-0.6	0.9	-0.1	-0.2	-0.8	-0.6	-0.2	1	0.9	-0.3	0.34
27	-0.8	-0.7	-0.8	0.7	-0.1	-0.4	-0.8	-0.8	-0.2	1	0.9	-0.5	0.2782
28	-0.8	-0.9	-0.6	0.9	-0.1	-0.2	-0.8	-0.8	-0.4	1	0.7	-0.3	0.288
29	-0.8	-0.7	-0.6	0.9	-0.3	-0.4	-0.8	-0.6	-0.4	0.8	0.7	-0.5	0.3425
30	-1	-0.9	-0.6	0.9	-0.3	-0.2	-1	-0.6	-0.4	0.8	0.7	-0.3	0.2786
31	-1	-0.9	-0.8	0.7	-0.1	-0.2	-1	-0.8	-0.2	1	0.9	-0.3	0.2218
32	-0.8	-0.9	-0.8	0.9	-0.1	-0.4	-1	-0.8	-0.4	0.8	0.9	-0.3	0.2661

**Tabla 3-18.** Resultados de simulación de etapa de distribución para el diseño factorial fraccionado  $2^{8-2}$

Corrida	C3,1→ C3	C3,2→ C3	C3,3→ C3	C3,1→ C3,2	C3,1→ C3,3	C3,2→ C3,3	C3,3→ C3,1	C3,3→ C3,2	Valor C3 (Desemp. Ditrib.)
1	1	-1	-0.9	-0.8	-0.6	0.7	-0.5	0.6	0.4259
2	0.8	-0.8	-0.9	-1	-0.6	0.7	-0.7	0.6	0.4241
3	1	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	0.7	-0.5	0.6	0.5263
4	1	-1	-0.7	-0.8	-0.6	0.9	-0.7	0.4	0.4533
5	1	-1	-0.9	-1	-0.6	0.9	-0.7	0.4	0.4186
6	1	-0.8	-0.9	-0.8	-0.6	0.9	-0.7	0.6	0.4306
7	1	-0.8	-0.9	-0.8	-0.8	0.7	-0.7	0.6	0.4598
8	0.8	-0.8	-0.7	-1	-0.8	0.7	-0.5	0.4	0.5151
9	0.8	-0.8	-0.9	-0.8	-0.8	0.9	-0.5	0.6	0.4302
10	0.8	-0.8	-0.7	-0.8	-0.6	0.9	-0.7	0.4	0.4619
11	0.8	-1	-0.9	-1	-0.8	0.7	-0.5	0.6	0.4178
12	0.8	-1	-0.7	-1	-0.6	0.7	-0.7	0.4	0.4454
13	1	-0.8	-0.7	-1	-0.8	0.9	-0.7	0.4	0.5165
14	0.8	-0.8	-0.9	-0.8	-0.8	0.7	-0.5	0.4	0.4598
15	1	-1	-0.7	-1	-0.8	0.9	-0.5	0.6	0.4837
16	1	-1	-0.9	-0.8	-0.8	0.7	-0.5	0.4	0.4569
17	0.8	-1	-0.7	-0.8	-0.8	0.9	-0.5	0.4	0.4506
18	0.8	-0.8	-0.7	-1	-0.8	0.9	-0.5	0.6	0.4881
19	0.8	-1	-0.7	-0.8	-0.6	0.7	-0.5	0.4	0.452
20	0.8	-1	-0.9	-0.8	-0.6	0.9	-0.7	0.6	0.3576
21	0.8	-0.8	-0.9	-0.8	-0.6	0.7	-0.5	0.6	0.4324
22	1	-0.8	-0.7	-0.8	-0.6	0.9	-0.5	0.6	0.5024
23	1	-1	-0.7	-1	-0.8	0.7	-0.5	0.4	0.5147
24	1	-1	-0.7	-1	-0.6	0.9	-0.5	0.4	0.491
25	1	-1	-0.9	-0.8	-0.6	0.9	-0.5	0.4	0.4292
26	0.8	-1	-0.9	-0.8	-0.8	0.9	-0.7	0.4	0.3859
27	1	-1	-0.9	-1	-0.8	0.7	-0.7	0.4	0.4472
28	1	-1	-0.7	-1	-0.6	0.7	-0.5	0.6	0.485
29	1	-0.8	-0.7	-1	-0.6	0.7	-0.7	0.4	0.518
30	0.8	-0.8	-0.9	-1	-0.8	0.7	-0.7	0.4	0.4517
31	1	-0.8	-0.9	-1	-0.8	0.7	-0.5	0.6	0.495
32	1	-0.8	-0.7	-1	-0.8	0.7	-0.7	0.6	0.5152
33	0.8	-0.8	-0.7	-0.8	-0.6	0.7	-0.7	0.6	0.4598
34	1	-0.8	-0.7	-0.8	-0.6	0.7	-0.5	0.4	0.5291
35	1	-0.8	-0.9	-1	-0.6	0.7	-0.5	0.4	0.4958
36	0.8	-0.8	-0.9	-0.8	-0.6	0.9	-0.5	0.4	0.4336
37	1	-0.8	-0.9	-1	-0.6	0.9	-0.5	0.6	0.4658
38	0.8	-1	-0.9	-0.8	-0.6	0.7	-0.7	0.4	0.3884
39	0.8	-1	-0.7	-0.8	-0.6	0.9	-0.5	0.6	0.423
40	0.8	-1	-0.7	-0.8	-0.8	0.7	-0.5	0.6	0.4466
41	0.8	-1	-0.7	-1	-0.8	0.7	-0.7	0.6	0.4398
42	1	-1	-0.7	-0.8	-0.8	0.9	-0.7	0.6	0.4453
43	1	-1	-0.7	-0.8	-0.6	0.7	-0.7	0.6	0.4492
44	0.8	-0.8	-0.7	-1	-0.6	0.7	-0.5	0.6	0.4893
45	1	-1	-0.9	-1	-0.8	0.9	-0.7	0.6	0.4121
46	1	-0.8	-0.9	-1	-0.8	0.9	-0.5	0.4	0.4955
47	1	-0.8	-0.7	-1	-0.6	0.9	-0.7	0.6	0.4896
48	1	-0.8	-0.9	-0.8	-0.8	0.9	-0.7	0.4	0.4578
49	0.8	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	0.7	-0.7	0.4	0.4841
50	0.8	-1	-0.9	-1	-0.8	0.9	-0.5	0.4	0.4214
51	0.8	-0.8	-0.7	-1	-0.6	0.9	-0.5	0.4	0.4935
52	1	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	0.9	-0.5	0.4	0.5277
53	0.8	-1	-0.7	-1	-0.8	0.9	-0.7	0.4	0.4439
54	0.8	-1	-0.9	-1	-0.6	0.9	-0.5	0.6	0.3901
55	0.8	-0.8	-0.9	-1	-0.8	0.9	-0.7	0.6	0.4206
56	1	-1	-0.7	-0.8	-0.8	0.7	-0.7	0.4	0.4773
57	0.8	-1	-0.7	-1	-0.6	0.9	-0.7	0.6	0.4149
58	1	-1	-0.9	-0.8	-0.8	0.9	-0.5	0.6	0.4236
59	0.8	-0.8	-0.7	-0.8	-0.8	0.9	-0.7	0.6	0.4562
60	1	-0.8	-0.9	-0.8	-0.6	0.7	-0.7	0.4	0.461
61	0.8	-1	-0.9	-0.8	-0.8	0.7	-0.7	0.6	0.3846
62	0.8	-1	-0.9	-1	-0.6	0.7	-0.5	0.4	0.4216
63	1	-1	-0.9	-1	-0.6	0.7	-0.7	0.6	0.4153
64	0.8	-0.8	-0.9	-1	-0.6	0.9	-0.7	0.4	0.4253

**Tabla 3-19.** Resultados de simulación de mapa principal (capa 1 - SCQM) para el diseño factorial fraccionado  $2^{15-9}$

Corrida	C1 → C6	C2 → C6	C3 → C6	C4 → C6	C5 → C6	C1 → C2	C2 → C3	C4 → C5	C4 → C1	C4 → C2	C4 → C3	C5 → C1	C5 → C2	C5 → C3	C5 → C4	Valor C6 (Desemp. SCQM)
1	1	0.8	0.8	-1	-0.9	0.9	0.8	0.9	-0.6	-0.4	-0.9	-0.7	-0.8	-0.6	1	0.4549
2	1	1	1	-0.8	-0.9	0.7	0.8	0.9	-0.8	-0.6	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	1	0.5533
3	1	0.8	1	-1	-0.9	0.9	0.6	0.9	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.4	0.8	0.5051
4	1	0.8	1	-0.8	-0.7	0.7	0.6	0.7	-0.8	-0.6	-0.9	-0.7	-0.8	-0.6	1	0.5566
5	1	1	0.8	-1	-0.7	0.9	0.6	0.7	-0.6	-0.4	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	1	0.5812
6	0.8	1	0.8	-0.8	-0.9	0.9	0.8	0.7	-0.6	-0.4	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	0.8	0.5989
7	1	1	0.8	-1	-0.9	0.9	0.6	0.7	-0.8	-0.6	-0.9	-0.7	-0.8	-0.6	0.8	0.4732
8	0.8	0.8	1	-0.8	-0.7	0.7	0.8	0.9	-0.6	-0.6	-0.7	-0.5	-0.6	-0.6	0.8	0.6093
9	1	0.8	1	-0.8	-0.7	0.9	0.6	0.7	-0.8	-0.6	-0.7	-0.5	-0.6	-0.4	0.8	0.6415
10	0.8	0.8	0.8	-1	-0.7	0.9	0.6	0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.5	-0.8	-0.4	1	0.525
11	1	1	1	-0.8	-0.9	0.9	0.8	0.9	-0.8	-0.6	-0.7	-0.5	-0.8	-0.6	0.8	0.5749
12	0.8	0.8	0.8	-0.8	-0.7	0.9	0.6	0.9	-0.6	-0.4	-0.7	-0.7	-0.8	-0.6	0.8	0.5655
13	1	0.8	0.8	-0.8	-0.9	0.9	0.8	0.7	-0.6	-0.6	-0.9	-0.5	-0.8	-0.4	0.8	0.5596
14	1	0.8	0.8	-0.8	-0.7	0.7	0.8	0.7	-0.8	-0.4	-0.7	-0.7	-0.8	-0.4	0.8	0.5978
15	1	1	1	-1	-0.7	0.9	0.8	0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	0.8	0.6122
16	0.8	1	0.8	-1	-0.7	0.7	0.8	0.9	-0.8	-0.4	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	1	0.5155
17	0.8	1	0.8	-0.8	-0.9	0.7	0.8	0.7	-0.6	-0.4	-0.9	-0.5	-0.8	-0.6	1	0.545
18	0.8	1	1	-0.8	-0.7	0.7	0.6	0.7	-0.8	-0.4	-0.7	-0.5	-0.6	-0.6	1	0.631
19	0.8	0.8	1	-1	-0.7	0.9	0.8	0.7	-0.6	-0.4	-0.9	-0.5	-0.8	-0.6	0.8	0.5636
20	0.8	0.8	0.8	-0.8	-0.9	0.7	0.6	0.9	-0.8	-0.6	-0.9	-0.5	-0.8	-0.6	0.8	0.4754
21	0.8	1	0.8	-1	-0.7	0.9	0.8	0.9	-0.8	-0.4	-0.7	-0.5	-0.8	-0.4	0.8	0.5622
22	0.8	0.8	0.8	-1	-0.9	0.9	0.6	0.7	-0.8	-0.4	-0.7	-0.5	-0.6	-0.6	0.8	0.404
23	1	1	0.8	-1	-0.9	0.7	0.6	0.7	-0.8	-0.6	-0.7	-0.5	-0.6	-0.4	1	0.5131
24	0.8	1	1	-1	-0.7	0.9	0.6	0.9	-0.6	-0.6	-0.9	-0.5	-0.8	-0.6	1	0.5125
25	0.8	1	1	-1	-0.9	0.7	0.6	0.9	-0.8	-0.4	-0.7	-0.7	-0.8	-0.6	1	0.4871
26	1	0.8	1	-1	-0.7	0.7	0.6	0.9	-0.8	-0.4	-0.9	-0.5	-0.8	-0.4	0.8	0.5533
27	1	0.8	0.8	-1	-0.7	0.9	0.8	0.9	-0.8	-0.6	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	0.8	0.5222
28	0.8	1	1	-0.8	-0.9	0.9	0.6	0.7	-0.6	-0.6	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	1	0.5516
29	1	1	1	-1	-0.9	0.7	0.8	0.7	-0.8	-0.4	-0.9	-0.5	-0.6	-0.6	0.8	0.5574
30	0.8	1	1	-1	-0.7	0.7	0.6	0.9	-0.8	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	0.8	0.5615
31	1	0.8	0.8	-0.8	-0.7	0.9	0.8	0.7	-0.8	-0.4	-0.9	-0.5	-0.6	-0.6	1	0.5974
32	0.8	1	1	-0.8	-0.7	0.9	0.6	0.7	-0.8	-0.4	-0.9	-0.7	-0.8	-0.4	0.8	0.6179
33	1	1	1	-1	-0.7	0.7	0.8	0.7	-0.6	-0.6	-0.9	-0.5	-0.8	-0.4	1	0.5858
34	0.8	1	0.8	-0.8	-0.7	0.9	0.8	0.7	-0.8	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.6	1	0.5651
35	1	1	0.8	-1	-0.7	0.7	0.6	0.7	-0.6	-0.4	-0.7	-0.5	-0.8	-0.6	0.8	0.5888
36	0.8	0.8	1	-1	-0.9	0.9	0.8	0.7	-0.8	-0.6	-0.9	-0.5	-0.6	-0.4	1	0.4917
37	1	0.8	0.8	-1	-0.7	0.7	0.8	0.9	-0.8	-0.6	-0.7	-0.5	-0.8	-0.6	1	0.5
38	0.8	0.8	0.8	-1	-0.7	0.7	0.6	0.7	-0.6	-0.6	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	0.8	0.5066
39	1	1	1	-0.8	-0.7	0.7	0.8	0.9	-0.6	-0.4	-0.9	-0.7	-0.8	-0.6	0.8	0.6233
40	0.8	0.8	0.8	-0.8	-0.9	0.9	0.6	0.9	-0.8	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	1	0.495
41	1	0.8	1	-1	-0.9	0.7	0.6	0.9	-0.6	-0.6	-0.9	-0.5	-0.6	-0.6	1	0.4837
42	0.8	0.8	1	-1	-0.7	0.7	0.8	0.7	-0.6	-0.4	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	1	0.5758
43	1	0.8	1	-0.8	-0.9	0.7	0.6	0.7	-0.6	-0.4	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	0.8	0.5858
44	0.8	0.8	1	-0.8	-0.7	0.9	0.8	0.9	-0.6	-0.6	-0.9	-0.7	-0.8	-0.4	1	0.5676
45	0.8	1	0.8	-0.8	-0.7	0.7	0.8	0.7	-0.8	-0.6	-0.9	-0.5	-0.6	-0.4	0.8	0.6066
46	0.8	1	0.8	-1	-0.9	0.9	0.8	0.9	-0.6	-0.6	-0.7	-0.5	-0.6	-0.6	1	0.4944
47	0.8	0.8	1	-1	-0.9	0.7	0.8	0.7	-0.8	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.6	0.8	0.4701
48	0.8	0.8	0.8	-0.8	-0.7	0.7	0.6	0.9	-0.6	-0.4	-0.9	-0.5	-0.6	-0.4	1	0.5781
49	1	0.8	1	-1	-0.7	0.9	0.6	0.9	-0.8	-0.4	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	1	0.5422
50	0.8	0.8	1	-0.8	-0.9	0.7	0.8	0.9	-0.8	-0.4	-0.7	-0.5	-0.8	-0.4	1	0.5423
51	1	1	0.8	-0.8	-0.7	0.9	0.6	0.9	-0.6	-0.6	-0.9	-0.5	-0.6	-0.6	0.8	0.6217
52	1	1	0.8	-0.8	-0.9	0.7	0.6	0.9	-0.8	-0.4	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	0.8	0.5555
53	1	1	0.8	-0.8	-0.7	0.7	0.6	0.9	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.8	-0.4	1	0.587
54	1	1	1	-0.8	-0.7	0.9	0.8	0.9	-0.6	-0.4	-0.7	-0.5	-0.6	-0.4	1	0.6876
55	0.8	1	1	-1	-0.9	0.9	0.6	0.9	-0.6	-0.4	-0.9	-0.5	-0.6	-0.4	0.8	0.5527
56	0.8	1	1	-0.8	-0.9	0.7	0.6	0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.5	-0.8	-0.4	0.8	0.5885
57	0.8	0.8	1	-0.8	-0.9	0.9	0.8	0.9	-0.8	-0.4	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	0.8	0.5324
58	1	1	0.8	-0.8	-0.9	0.9	0.6	0.9	-0.8	-0.4	-0.9	-0.5	-0.8	-0.4	1	0.5459
59	0.8	1	0.8	-1	-0.9	0.7	0.8	0.9	-0.6	-0.6	-0.9	-0.7	-0.8	-0.4	0.8	0.4647
60	0.8	0.8	0.8	-1	-0.9	0.7	0.6	0.7	-0.8	-0.4	-0.9	-0.7	-0.8	-0.4	1	0.4364
61	1	0.8	0.8	-0.8	-0.9	0.7	0.8	0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	1	0.5353
62	1	0.8	0.8	-1	-0.9	0.7	0.8	0.9	-0.6	-0.4	-0.7	-0.5	-0.6	-0.4	0.8	0.5311
63	1	0.8	1	-0.8	-0.9	0.9	0.6	0.7	-0.6	-0.4	-0.7	-0.5	-0.8	-0.6	1	0.5816
64	1	1	1	-1	-0.9	0.9	0.8	0.7	-0.8	-0.4	-0.7	-0.7	-0.8	-0.4	1	0.5421

En la Tabla 3-20 se muestran los estadísticos descriptivos básicos de las variables respuesta de cada mapa del proceso de simulación. Los coeficientes de variación de los resultados varían entre un mínimo de 2.36% y un máximo de 11.8%, por lo que es posible afirmar que la media obtenida y su correspondiente intervalo de confianza son una adecuada representación del conjunto de datos de los resultados en todos los casos.

**Tabla 3-20.** Estadísticos resumen de las variables respuesta del modelo.

Capa	# FGCM	Variable respuesta	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variación	Intervalo de confianza al 95%
Capa 1	FGCM 1 (Principal)	C6: Desempeño de SCQM	0.5491	0.0532	9.68%	$\otimes C6 \in [0.5419, 0.5563]$
Capa 2	FGCM 2 (SubFGCM)	C1: Desempeño en Abastecimiento	0.8254	0.0195	2.36%	$\otimes C1 \in [0.8152, 0.8356]$
	FGCM 3 (SubFGCM)	C2: Desempeño en Fabricación	0.2796	0.033	11.8%	$\otimes C2 \in [0.2694, 0.2898]$
	FGCM 4 (SubFGCM)	C3: Desempeño en Distribución	0.4551	0.0395	8.69%	$\otimes C3 \in [0.4478, 0.4623]$

### 3.5.5 Análisis de efectos

A continuación, se presenta el análisis de resultados de cada uno de los experimentos realizados. Para ello, se realizó un procedimiento secuencial en fases, donde se iban excluyendo y trasladando al error los efectos no significativos hasta lograr el modelo final mostrado en cada caso, con las fuentes de variación claramente significativas (Gutiérrez & De La Vara, 2012). Para el análisis de los experimentos se utilizó el software Statgraphics Centurion XVIII<sup>®</sup>.

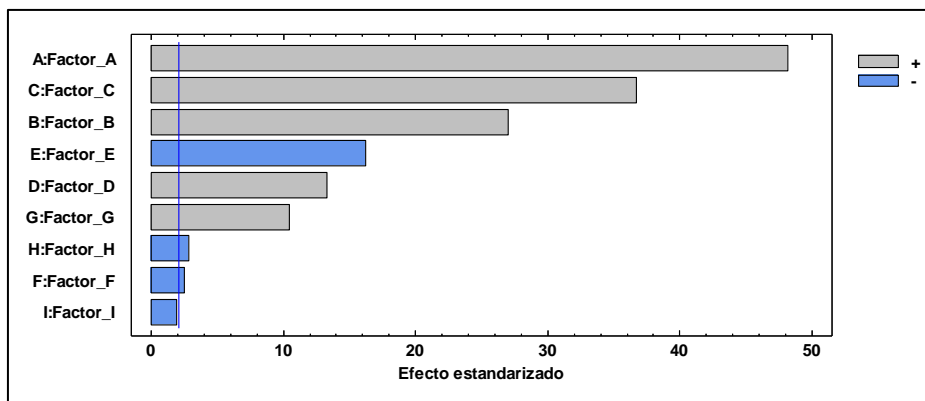
#### ▪ Análisis de efectos en la etapa de Abastecimiento

El análisis de los resultados del experimento arrojó que no son significativos los efectos de las interacciones dobles y triples. También, el análisis de varianza (Tabla 3-21), el Diagrama de Pareto estandarizado de los efectos (Figura 3-2) y la gráfica de efectos principales (Figura 3-3) muestran que los efectos de los factores principales son significativos, a excepción del factor I, que corresponde a la interrelación C1,3→C1,4 (desde *Fill rate* en abastecimiento hasta costo de ordenar). En el contexto del modelado

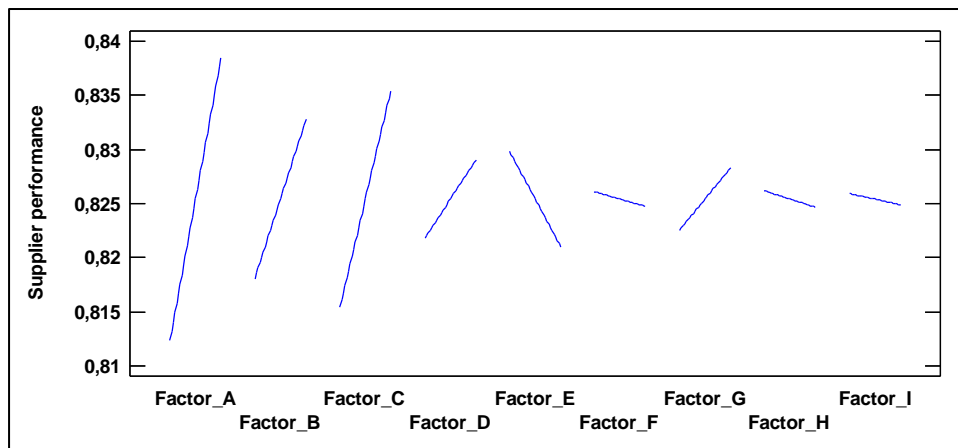
usando FGCM, esto significa que para el peso de esta interrelación no es necesario trabajar con un número gris, sino que se puede utilizar un valor concreto, generalmente, el valor medio del intervalo especificado ( $w_{1,3 \rightarrow 1,4} = -0.95$ ). Cuando se excluye este efecto del análisis de varianza, se obtiene un coeficiente de determinación ajustado de 99.3%. El estadístico de Durbin-Watson (DW) para los residuos fue de 1.7408 ( $P=0.2045$ ), lo cual indica que no hay evidencia de autocorrelación serial en los residuos, con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

**Tabla 3-21.** Análisis de varianza para Desempeño en Abastecimiento.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Factor_A	0.00546535	1	0.00546535	2324.00	0.0000
B:Factor_B	0.00171405	1	0.00171405	728.85	0.0000
C:Factor_C	0.00317206	1	0.00317206	1348.83	0.0000
D:Factor_D	0.000417605	1	0.000417605	177.58	0.0000
E:Factor_E	0.000621281	1	0.000621281	264.18	0.0000
F:Factor_F	0.00001458	1	0.00001458	6.20	0.0208
G:Factor_G	0.000257645	1	0.000257645	109.56	0.0000
H:Factor_H	0.000018605	1	0.000018605	7.91	0.0101
I:Factor_I	0.00000861125	1	0.00000861125	3.66	0.0688
Error total	0.0000517375	22	0.0000023517		
Total (corr.)	0.0117415	31			



**Figura 3-2.** Diagrama de Pareto estandarizado de los efectos para Desempeño en Abastecimiento.



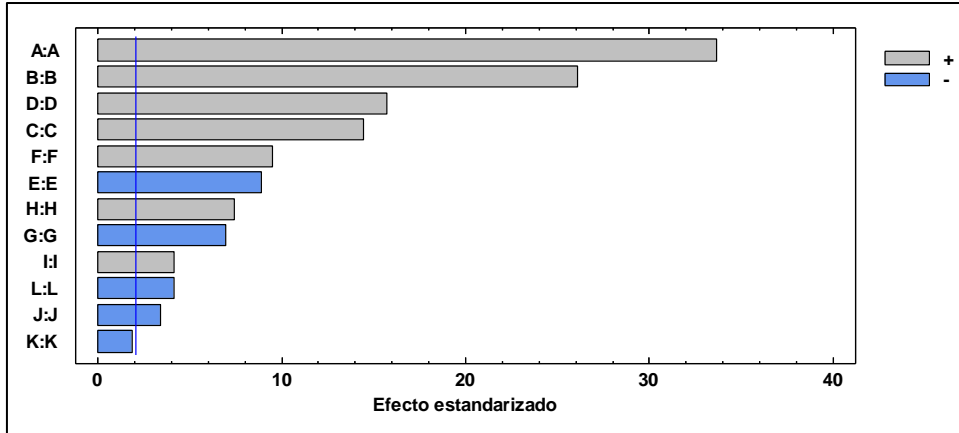
**Figura 3-3.** Gráfica de efectos principales para Desempeño en Abastecimiento.

#### ▪ Análisis de efectos en la etapa de Fabricación

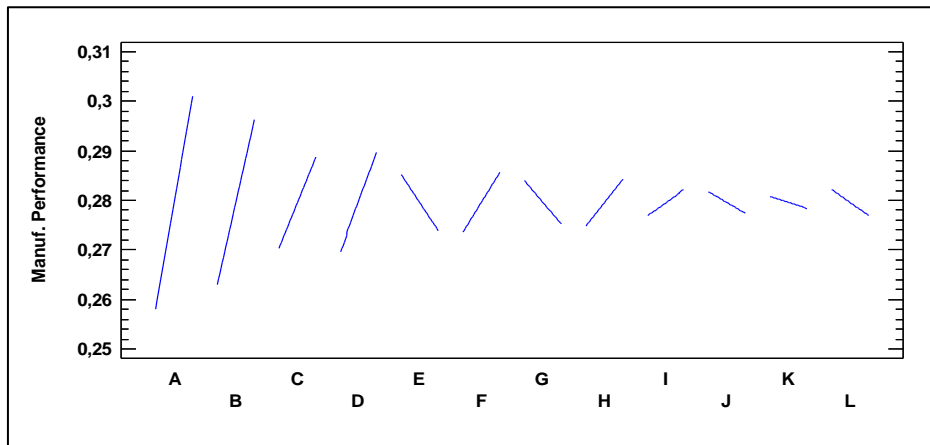
El análisis de varianza de los resultados de la etapa de fabricación (Tabla 3-22) muestra que el efecto del factor K no es estadísticamente significativo. Esto se nota también en el comportamiento del diagrama de Pareto estandarizado de los efectos (Figura 3-4) y la gráfica de efectos principales (Figura 3-5). El factor K corresponde a la interrelación C2,3→C2,1 (desde emisiones, efluentes y desperdicios hasta costo unitario de fabricación). Luego, al peso de esta interrelación se le puede asignar un valor concreto, generalmente, el valor medio del intervalo asignado ( $w_{2,3 \rightarrow 2,1} = 0.8$ ). Al excluir este efecto del análisis de varianza, se obtiene un coeficiente de determinación ajustado de 98.7%. El estadístico de Durbin-Watson (DW) para los residuos fue de 1.7956 ( $P=0.2031$ ), lo cual indica que no hay evidencia de autocorrelación serial en los residuos, con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

**Tabla 3-22.** Análisis de varianza para Desempeño en Fabricación.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:A	0.0146462	1	0.0146462	1133.64	0.0000
B:B	0.00879138	1	0.00879138	680.47	0.0000
C:C	0.00269745	1	0.00269745	208.79	0.0000
D:D	0.003196	1	0.003196	247.38	0.0000
E:E	0.00101701	1	0.00101701	78.72	0.0000
F:F	0.00117128	1	0.00117128	90.66	0.0000
G:G	0.000621281	1	0.000621281	48.09	0.0000
H:H	0.000710645	1	0.000710645	55.01	0.0000
I:I	0.000223661	1	0.000223661	17.31	0.0005
J:J	0.000149645	1	0.000149645	11.58	0.0030
K:K	0.0000456013	1	0.0000456013	3.53	0.0757
L:L	0.000222605	1	0.000222605	17.23	0.0005
Error total	0.000245471	19	0.0000129195		
Total (corr.)	0.0337382	31			



**Figura 3-4.** Diagrama de Pareto estandarizado de los efectos para Desempeño en Fabricación.



**Figura 3-5.** Gráfica de efectos principales para Desempeño en Fabricación.

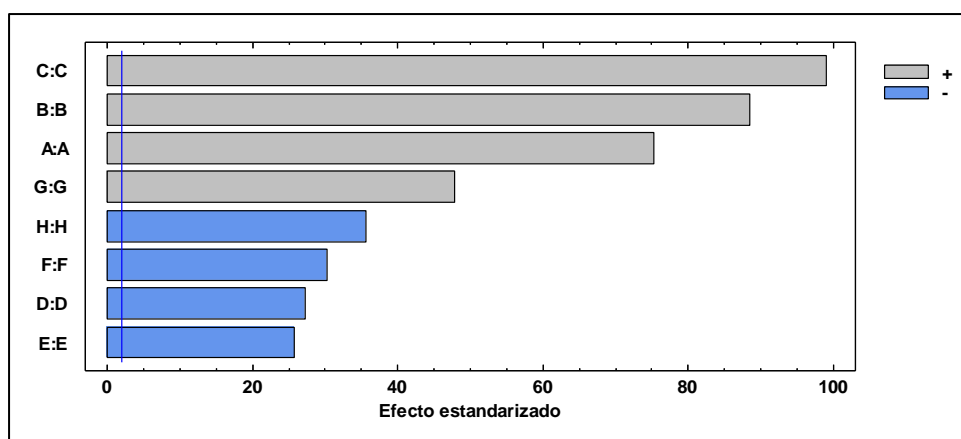
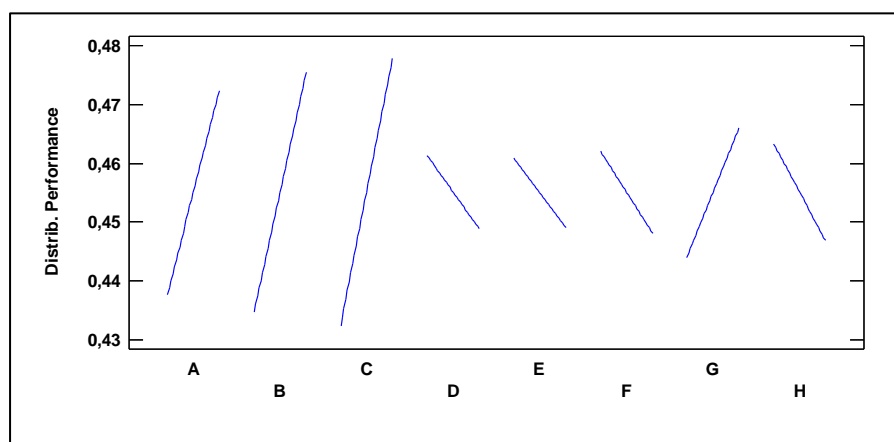
#### ▪ **Análisis de efectos en la etapa de Distribución**

El análisis de varianza de los resultados de la etapa de distribución (Tabla 3-23) muestra que todos los efectos principales son estadísticamente significativos, corroborando la selección inicial de los conceptos y la asignación de valores grises a los pesos de las interrelaciones. Esto se nota también en el comportamiento del diagrama de Pareto estandarizado de los efectos (Figura 3-6) y la gráfica de efectos principales (Figura 3-7). El coeficiente de determinación ajustado del modelo es de 99.8%. El estadístico de Durbin-Watson (DW) para los residuos fue de 1.8869 ( $P=0.2891$ ), lo cual indica que no hay evidencia de autocorrelación serial en los residuos, con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .



**Tabla 3-23.** Análisis de varianza para Desempeño en Distribución.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:A	0.019082	1	0.019082	5659.91	0.0000
B:B	0.0264022	1	0.0264022	7831.16	0.0000
C:C	0.0330013	1	0.0330013	9788.51	0.0000
D:D	0.00249375	1	0.00249375	739.67	0.0000
E:E	0.00223611	1	0.00223611	663.25	0.0000
F:F	0.00308997	1	0.00308997	916.52	0.0000
G:G	0.00769348	1	0.00769348	2281.96	0.0000
H:H	0.00428861	1	0.00428861	1272.05	0.0000
Error total	0.000185429	55	0.00000337143		
Total (corr.)	0.0984728	63			

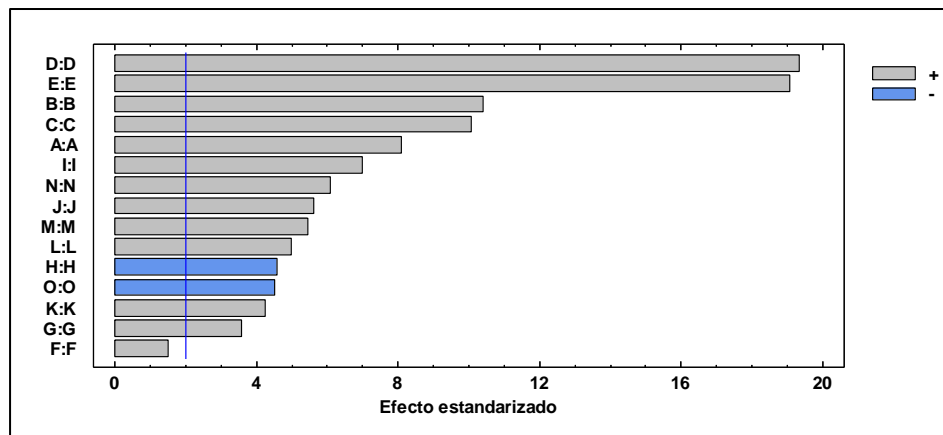
**Figura 3-6.** Diagrama de Pareto estandarizado de los efectos para Desempeño en Distribución.**Figura 3-7.** Gráfica de efectos principales para Desempeño en Distribución.

▪ **Análisis de efectos en el mapa principal (SCQM)**

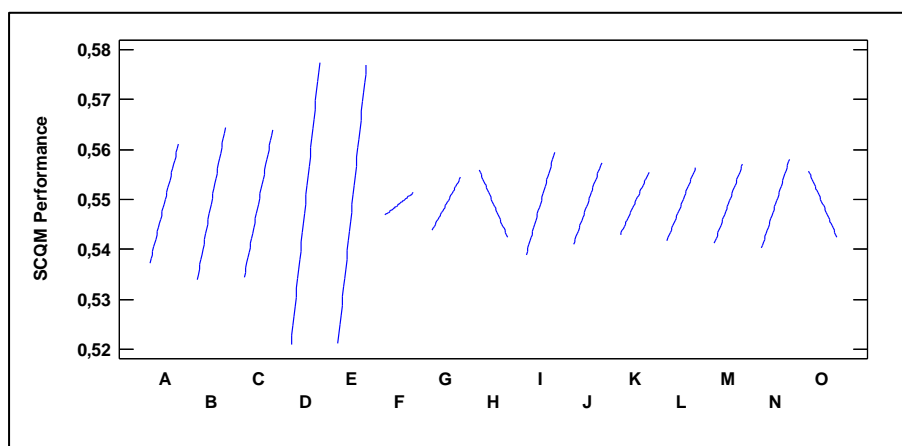
El análisis de varianza de los resultados del mapa principal (SCQM) (Tabla 3-24) muestra que el efecto del factor F -que corresponde a la interacción C1→C2, desde desempeño en abastecimiento hasta desempeño en fabricación- no es estadísticamente significativo. Esto es evidenciado gráficamente en el comportamiento del diagrama de Pareto estandarizado de los efectos (Figura 3-8) y la gráfica de efectos principales (Figura 3-9). Por tanto, al peso de la interrelación entre desempeño en abastecimiento y desempeño en fabricación se le puede asignar un valor concreto, generalmente, el valor medio del intervalo asignado ( $w_{1 \rightarrow 2} = 0.8$ ). Posteriormente, al excluir este efecto del análisis de varianza, se obtiene un coeficiente de determinación ajustado de 95.1%. El estadístico de Durbin-Watson (DW) para los residuos fue de 2.1949 ( $P=0.8002$ ), lo cual indica que no hay evidencia de autocorrelación serial en los residuos, con un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$ .

**Tabla 3-24.** Análisis de varianza para Desempeño en SCQM.

Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:A	0.00895626	1	0.00895626	65.71	0.0000
B:B	0.014741	1	0.014741	108.15	0.0000
C:C	0.013774	1	0.013774	101.05	0.0000
D:D	0.050901	1	0.050901	373.44	0.0000
E:E	0.0494896	1	0.0494896	363.09	0.0000
F:F	0.000313733	1	0.000313733	2.30	0.1358
G:G	0.00175456	1	0.00175456	12.87	0.0008
H:H	0.00287966	1	0.00287966	21.13	0.0000
I:I	0.00666468	1	0.00666468	48.90	0.0000
J:J	0.00428207	1	0.00428207	31.42	0.0000
K:K	0.00247382	1	0.00247382	18.15	0.0001
L:L	0.00339743	1	0.00339743	24.93	0.0000
M:M	0.00402432	1	0.00402432	29.52	0.0000
N:N	0.00506766	1	0.00506766	37.18	0.0000
O:O	0.00277597	1	0.00277597	20.37	0.0000
Error total	0.00654254	48	0.000136303		
Total (corr.)	0.178038	63			



**Figura 3-8.** Diagrama de Pareto estandarizado de los efectos para Desempeño en SCQM.



**Figura 3-9.** Gráfica de efectos principales para Desempeño en SCQM.

Finalmente, de la validación del modelo ML-FGCM-SCQM usando diseño factorial fraccionado, se puede concluir:

- Es posible integrar el enfoque del diseño de experimentos para la validación de los resultados del proceso de inferencia en el modelado de sistemas con FGCM. Esto permite tratar adecuadamente la incertidumbre propia de estos modelos sin recurrir a generalizaciones de procesos de concreción donde se trabaja con valores concretos de la fortaleza de las relaciones entre conceptos.

- El uso del diseño factorial fraccionado es adecuado para la validación de modelos de simulación con una cantidad importante de factores ( $k \geq 5$ ), dado que permite reducir el número de corridas experimentales sin perder información relevante del proceso. Es importante seleccionar diseños con resoluciones altas (IV o V) con el fin de evitar la confusión entre efectos principales o con interacciones de dos o tres factores.
- La aplicación del diseño factorial fraccionado permitió validar el comportamiento dinámico del modelo ML-FGCM-SCQM desarrollado: (i) los conceptos seleccionados resultaron apropiados para representar las diferentes etapas y capas del modelo, y, (ii) se validó que el enfoque de modelado usando FGCM fue adecuado dado que, de un total de 44 factores, solo 3 (6.8%) resultaron no significativos en cuanto al uso del valor gris especificado. Así, el 93.2% de los factores resultaron significativos y el uso de un valor intervalo gris es adecuado y necesario para el funcionamiento del modelo.
- Los coeficientes de determinación ajustados obtenidos en los mapas con los efectos de los factores principales ( $R^2_{FGCM1} = 95.1\%$ ,  $R^2_{FGCM2} = 99.3\%$ ,  $R^2_{FGCM3} = 98.7\%$  y  $R^2_{FGCM4} = 99.8\%$ ) confirman la significancia de dichos factores para el modelo y que el resto de los efectos (interacciones dobles o triples o combinación de efectos principales con estas) es inocuo para propósitos prácticos.

### 3.6 Conclusión

En este capítulo se mostraron los resultados relacionados con los objetivos específicos 3 y 4 de la investigación: elaborar un modelo analítico para la gestión de la calidad en cadenas de suministro integrando técnicas de modelado multi-etapas y validar el modelo propuesto a través de técnicas apropiadas, con el fin de establecer su adecuación a la complejidad de actores y elementos de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, en comparación con los modelos tradicionales.

En primera instancia, se elaboró el modelo analítico multi-etapas para la gestión de la calidad en cadenas de suministro, siguiendo una metodología de cinco pasos: (i) Selección de variables, (ii) Determinación de relaciones causales, (iii) Construcción del modelo, (iv) Análisis de la estructura del modelo, y, (v) Validación del desempeño del modelo.

---

La construcción del modelo se validó aplicando los dos enfoques requeridos para el análisis de modelos usando mapas cognitivos: análisis estáticos y análisis dinámico. El análisis estático de la complejidad de la estructura a través del cálculo de los índices de densidad permite concluir que el modelo tiene una complejidad media-alta en cuanto al número de variables y cantidad de interrelaciones. Para el análisis dinámico se aplicaron diseños experimentales fraccionados con el fin evaluar la convergencia y los efectos significativos de los factores principales.

Los resultados de las variables respuesta en los 4 mapas tuvieron coeficientes bajos coeficientes de variación (entre 2.36% y 11.8%) por lo que los intervalos de confianza para la media obtenidos son representativos del conjunto de datos de los valores de convergencia del modelo. El análisis de los diseños experimentales fraccionados permitió validar la escogencia de valores grises del 93.2% de los factores, esto es, cualquier pequeña variación en el valor de peso de la interrelación de estos tiene un efecto significativo sobre la variable respuesta. Este resultado permite interpretar que la validación vía simulación con experimentos factoriales fraccionados permitió cuantificar que la metodología de construcción del modelo logró una efectividad del 93.2% en la selección de variables y sus interrelaciones. Este es un aspecto por resaltar de los resultados de la investigación: el uso de diseño de experimentos proporciona una nueva alternativa para el análisis de modelos cognitivos grises difusos.

En el mismo sentido, el diseño de experimentos también permitió cuantificar la capacidad de los factores para explicar los cambios en la variable respuesta. En el caso del mapa 1, los 14 factores que resultaron significativos explican el 95.1% de la varianza en el desempeño en la gestión de la calidad en cadenas de suministro. En el mapa 2, los 8 factores significativos explican el 99.3% de la varianza. En el mapa 3 los 11 factores significativos explican el 98.7% de la varianza en el desempeño en abastecimiento. En el mapa 4, los 8 factores significativos explican el 99.8% de la varianza en el desempeño en distribución. Estos resultados también validan la escogencia de conceptos y pesos de las interrelaciones del modelo.

## **4. Discusión de resultados y publicaciones**

En este capítulo se realiza la discusión sobre el diseño metodológico utilizado y los resultados obtenidos con el mismo, estableciendo planteamientos desde una perspectiva interna en lo referente a la ejecución de la investigación y una perspectiva externa con respecto a trabajos previos identificados en la literatura. También, se muestran los productos de divulgación de nuevo conocimiento en diferentes categorías y los productos de formación de recursos humanos obtenidos.

### **4.1 Discusión sobre el diseño metodológico**

El planteamiento inicial del problema de investigación se centró en la necesidad de estudiar la gestión de la calidad en cadenas de suministro como un problema complejo y de creciente interés académico y empresarial. Específicamente, se evidenció la necesidad de evaluar estructuras relacionales para la toma de decisiones táctico-estratégicas en la gestión de cadenas de suministro, considerando variables de estado apropiadas, esto es, específicas del constructo “gestión de la calidad en cadenas de suministro”.

Así, se planteó la hipótesis que orientó la investigación: el uso de metodologías de modelado multi-etapas en el desarrollo de un modelo analítico, permitirá representar la coordinación e integración de la gestión de la calidad en el contexto de las cadenas de suministro y superar las falencias identificadas en los modelos tradicionales, considerando múltiples niveles de la cadena de suministro y con indicadores de desempeño adecuados.

Los resultados mostrados en los capítulos previos evidencian que la hipótesis de la investigación es verdadera y que el diseño metodológico utilizado permitió observar y medir sus elementos. Primero, se realizó la verificación de antecedentes y se desarrolló una conceptualización propia sobre la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, basándose en una revisión sistemática de literatura y en el uso del enfoque de clasificación taxonómica de los trabajos previos. Luego, se determinaron las

variables de estado propias que representan la gestión de la calidad en cadenas de suministro con los enfoques de desempeño global y desempeño en cada una de las tres etapas principales de abastecimiento, fabricación y distribución.

Posteriormente, se desarrolló una metodología de modelado que integró el modelado con mapas cognitivos grises difusos multi-etapa, simulación y diseño de experimentos. El modelo resultante, integrando las variables y relaciones causales previamente establecidas, fue validado a través de su desempeño estático y dinámico, corroborando su validez estadística para representar la coordinación e integración de la gestión de la calidad en múltiples etapas de la cadena de suministro.

## **4.2 Discusión sobre el modelo y sus resultados**

La metodología de modelado multi-etapa integrando mapas cognitivos grises difusos y diseño de experimentos es novedosa y no se encontraron trabajos previos con su aplicación en el estudio de la gestión de la calidad en cadenas de suministro. Por ello, tal como se mencionó arriba, el aporte principal de la tesis es el modelo en sí mismo y no existen modelos similares con los cuales comparar su desempeño. Entonces, la discusión de los resultados se realiza teniendo como referentes trabajos previos donde se investigaron estrategias colaborativas en la gestión de cadenas de suministro.

### **4.2.1 Resultados de la etapa de abastecimiento**

En la etapa de abastecimiento resultó no significativa la interacción entre las variables C1,3 y C1,4 (desde *Fill rate* hasta costo de ordenar), indicando que lo adecuado es utilizar un valor concreto para el peso de la interrelación antes que un valor intervalo gris. Es decir, su impacto sobre el desempeño en abastecimiento no está sujeto a altas condiciones de incertidumbre. Este resultado es consistente con trabajos previos en donde se probó que en el contexto de la toma de decisiones conjuntas en cadenas de suministro la tasa objetivo de *Fill rate* debe especificarse previamente en el contrato y que el impacto de su variación no es significativo en la reducción de costos (Choudhary, Shankar, Tiwari, & Purohit, 2016).

Asimismo, no es realista o beneficioso para los socios de la cadena de suministro tener indicadores de *Fill rate* bajos o con alta variabilidad. Generalmente, la determinación del *Fill rate* objetivo es una solución de compromiso con los costos totales del sistema logístico y el enfoque adecuado es establecer la mejor configuración posible de conteo de ciclos

dado un conjunto de artículos (Gumrukcu, Rossetti, & Buyurgan, 2008). Adicionalmente, se ha probado que el impacto del *Fill rate* en el desempeño en abastecimiento requiere de la implementación de impulsores como la clasificación de productos y la mejora en la precisión de los pronósticos (Chinello, Lee Herbert-Hansen, & Khalid, 2020).

#### **4.2.2 Resultados de la etapa de fabricación**

En la etapa de fabricación resultó no significativa la interacción entre las variables C2,2 y C2,1 (desde producto defectuoso en fabricación hasta costo unitario de fabricación), indicando que su impacto sobre el desempeño en fabricación no depende en gran medida de la variabilidad del peso de la interacción y se puede utilizar un valor concreto para su cuantificación. Generalmente, luego de las inspecciones, un porcentaje de los productos defectuosos se reutiliza y el resto se elimina internamente o a través de un tercero a un costo fijo. Además, es posible controlar la incidencia de producto defectuoso implementando estrategias de fabricación ágil y toma de decisiones conjuntas en cadenas de suministro de ciclo cerrado (Hasani, Zegordi, & Nikbakhsh, 2012).

Por otro lado, los resultados del modelo en esta etapa de la cadena permiten identificar un impacto significativo del producto defectuoso sobre el desempeño en fabricación (esta interacción resultó significativa). Esto es coherente con modelos previos, donde se prueba que continúa vigente la necesidad de la inspección en fabricación y la incertidumbre asociada a los resultados de la proporción de defectuosos, debido a su interrelación con la tasa de producción, el tamaño de los pedidos y el *lead time* de la demanda (Mallick, Manna, & Mondal, 2018).

#### **4.2.3 Resultados de la etapa de distribución**

En la etapa de distribución resultaron significativas todas las interacciones entre las variables de estado seleccionadas. Por tanto, es importante considerar variaciones mínimas en el valor del peso de las interacciones en el análisis de sus efectos sobre el desempeño de la etapa. Los riesgos inherentes a la distribución física hacen que las interacciones entre el costo unitario de distribución, entregas perfectas al cliente y rechazos y devoluciones de clientes estén sujetas a altas condiciones de incertidumbre e impacten de forma significativa en el desempeño (Jaqueta, Mashilo, Mocke, & Agigi, 2020).



Das y Lashkari (2015) resaltan la importancia de los planes de distribución para el desempeño óptimo de los negocios y la interrelación entre los modos de distribución, las entregas perfectas y la calidad del producto. También afirman que, para garantizar una capacidad de respuesta apropiada, es necesario considerar condiciones de flexibilidad en la localización y tamaño de las instalaciones, densidad de clientes y requisitos de estos para la entrega. Similarmente, en modelos de distribución que incorporan el deterioro de calidad de los productos, se ha encontrado que es necesario considerar la relación entre este y las distancias recorridas en la entrega, especialmente en productos perecederos (Chen, Fan, & Pan, 2021).

#### **4.2.4 Resultados del mapa principal (desempeño de SCQM)**

En el mapa principal -desempeño global en SCQM- resultó no significativa la interacción entre las variables C1 y C2 (desde desempeño en la etapa de abastecimiento hasta desempeño en la etapa de fabricación). En el trabajo de Çankaya (2020) se estudiaron los efectos positivos del abastecimiento estratégico sobre el desempeño de cadenas de suministro y su contribución al mejoramiento de la competitividad. Sin embargo, se enfocó en las estrategias *agile* y *lean* y consideró los aspectos de gestión de la calidad en cadenas de suministro solo como algunas variables observadas en el modelo de análisis factorial confirmatorio.

Las variables origen con mayor impacto sobre el desempeño en SCQM fueron: costos logísticos totales, costos de la calidad, desempeño en distribución y desempeño en fabricación. Este hallazgo es similar al de Park (2005), quien establece la necesidad de analizar y planear conjuntamente los sistemas de producción y distribución como una estrategia exitosa para maximizar el beneficio neto total. Por otro lado, en el trabajo de Pettersson y Segerstedt (2013) se probó que la cuantificación y desagregación de los costos logísticos en las etapas de fabricación y distribución es fundamental para la toma de decisiones adecuadas para el mejoramiento del desempeño global en costos de la cadena de suministro.

En el modelo de costos desarrollado por Chiadamrong y Wajcharapornjinda (2012) se consideran los costos de calidad como una de las categorías principales de los costos de cadenas de suministro y resaltan la necesidad de cuantificarlos en todas las etapas de la cadena. También, Galindo-Pacheco et al (2012) cuantifican el impacto de los costos de

calidad sobre la minimización de los costos en cadenas de suministro, desde la perspectiva de los costos operativos de planes de inspección.

## 4.3 Publicaciones

En el desarrollo de la investigación se han generado productos de divulgación de nuevo conocimiento en diferentes categorías y productos de formación de recursos humanos. El enfoque metodológico secuencial utilizado permitió la divulgación de los desarrollos previos, principalmente, en forma de artículos científicos y ponencias en congresos internacionales.

### 4.3.1 Artículos publicados y sometidos

Cogollo-Flórez, J. & Correa-Espinal, A. (2019). Analytical modeling of supply chain quality management coordination and integration: A literature review. *Quality Management Journal*, 26 (2), 72-83. DOI: 10.1080/10686967.2019.1580553. (Q2 en SJR).

Cogollo-Flórez, J. & Ruiz-Vásquez, C. (2019). Prácticas de responsabilidad sostenible de cadenas de suministro: revisión y propuesta. *Revista Venezolana de Gerencia*, 24 (87), 668-683. (Q3 en SJR).

Cogollo-Flórez, J. & Correa-Espinal, A. (2017). La gestión de la calidad en cadenas de suministro: Desarrollos y tendencias. *Espacios*, 38 (37), 16-38. (Q3 en SJR).

Cogollo-Flórez, J. & Restrepo, M. Una propuesta de clasificación taxonómica del problema de recogida de productos defectuosos. Sometido a *Revista UIS Ingenierías* (24-10-2020). (Publindex B).

Cogollo-Flórez, J., Correa-Espinal, A. & Restrepo, M. Propuesta de modelo de costos para el diseño y ejecución de recogidas de productos del mercado. Sometido a *Revista Venezolana de Gerencia* (15-03-2020). (Q3 en SJR).

### 4.3.2 Ponencias y Memorias

Cogollo-Flórez, J., Correa-Espinal, A., Márquez, C. & Cacho, R. (2020). Relationship between Quality Practices and Sustainable Supply Chain Performance. En *Proceedings of The International Conference of Production Research – Americas 2020* (pp. 1-8). Bahía Blanca (Argentina).

Cogollo-Flórez, J. & Correa-Espinal, A. (2019). Modeling Supply Chain Quality Management using Multi-Layer Fuzzy Cognitive Maps. En *Proceedings of The 2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)* (pp. 1-6). New Orleans (USA). ISBN 978-1-5386-1728-1. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858995.

- Restrepo, M., Cogollo-Flórez, J. & Restrepo, A. (2019). La gestión de la calidad en cadenas de suministro: los eventos de recogida de productos. En *Memorias de VII Jornadas de Investigación Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas* (pp. 65-66). Medellín (Colombia). ISSN 2665-5217 (en línea).
- Cuellar, M. & Cogollo-Flórez, J. (2019). Una propuesta de concepto y retos de la Gestión de la Cadena de Suministro Circular. En I Encuentro Nacional de Semilleros de Investigación. Medellín (Colombia).
- Cogollo-Flórez, J. & Valencia, O. (2019). Modelo de control de calidad de procesos aplicando mapas cognitivos difusos. En *Memorias del I Congreso Internacional de Ingeniería con Impacto Social* (pp. 88-94). Medellín (Colombia). ISSN 2539-1925. <https://doi.org/10.16925/ecam.02>.
- Cogollo-Flórez, J. & Correa-Espinal, A. (2018). Rule-based Modeling of Supply Chain Quality Management. En *Proceedings of The 18th International Conference on Modeling and Applied Simulation* (pp. 120-125). Budapest (Hungria). ISBN 978-88-85741-07-2.
- Ruiz, C. & Cogollo-Flórez, J. (2018). Metodología para la implementación de prácticas de responsabilidad social de cadenas de suministro. En *Memorias del V Congreso Internacional Industria y Organizaciones* (pp. 98-99). Bogotá (Colombia). ISSN 2590-7336 No 2.
- Cogollo-Flórez, J. & Correa-Espinal, A. (2017). Modeling Supply Chain Quality Management Performance. En *Proceedings of The 17th International Conference on Modeling and Applied Simulation* (pp. 115-122). Barcelona (España). ISBN 978-88-97999-91-1.
- Hernández, D., Murillo, L., Restrepo, A. & Cogollo-Flórez, J. (2017). Modelos para la identificación y análisis de partes interesadas pertinentes. En *Memorias del III Congreso Internacional de Investigación en Calidad* (pp. 38-47). Medellín (Colombia). ISBN 978-959-16-4261-5.
- Valencia, O., Restrepo, A. & Cogollo-Flórez, J. (2017). Gestión del aprovisionamiento en una empresa de servicios deportivos y culturales aplicando los principios de la norma ISO 9001:2015. En *Memorias del III Congreso Internacional de Investigación en Calidad* (pp. 58-66). Medellín (Colombia). ISBN 978-959-16-4261-5.
- Garzón, V., Restrepo, A. & Cogollo-Flórez, J. (2017). Análisis de la integración de la gestión de la calidad en una cadena de suministro del sector automotriz. En *Memorias del III Congreso Internacional de Investigación en Calidad* (pp. 164-173). Medellín (Colombia). ISBN 978-959-16-4261-5.
- Cogollo-Flórez, J. & Garzón, V. (2017). Medición de la sostenibilidad en gestión de cadenas de suministro. En *Memorias del IV Congreso Internacional Industria y Organizaciones* (p. 31). Medellín (Colombia). ISSN 2590-7336.

Cogollo-Flórez, J., Garzón, V. & Restrepo, A. (2017). La gestión de la calidad en cadenas de suministro. En *Memorias del IV Congreso Internacional Industria y Organizaciones* (p. 44). Medellín (Colombia). ISSN 2590-7336.

Cogollo-Flórez, J. & Cardona, G. (2016). Benchmarking de la medición del desempeño logístico en Colombia. En *Memorias del Encuentro de Investigación ASCOLFA 2016* (pp. 1123-1152). Barranquilla (Colombia). ISSN 2359-5157 (en línea).

### **4.3.3 Formación de recursos humanos**

Valencia, O. (2019). *Control de la calidad de procesos aplicando mapas cognitivos difusos*. Trabajo de Grado. Ingeniería de Producción, Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín.

Restrepo, M. (2019). *Evaluación de estrategias de recogida de productos (Recalls) en el contexto de la Gestión de la Calidad en Cadenas de Suministro*. Proyecto de Formación de Joven Investigador. Convocatoria Interna Jóvenes Investigadores e Innovadores ITM 2019. Resolución Rectoral 135 de 2019, Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín.

Ruiz, C. (2018). *Evaluación de las prácticas de Responsabilidad Social de Cadena de Valor en los Sistemas de Gestión de la Calidad*. Proyecto de Formación de Joven Investigador. Convocatoria Interna Jóvenes Investigadores e Innovadores ITM 2018. Resolución Rectoral 68 de 2018, Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín.

## **5. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros**

Este documento de memoria presenta los aspectos centrales de la investigación doctoral realizada con el objetivo principal de desarrollar un modelo analítico multi-etapas para la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro. Los elementos mostrados permiten concluir sobre el logro de los objetivos planteados y la definición de líneas de investigación futuras.

### **5.1 Conclusiones**

Se evidenció el logro del objetivo específico 1 -caracterizar las dimensiones y elementos del constructo “gestión de la calidad en cadenas de suministro usando un enfoque multi-etapas”-, dado que se realizó una revisión sistemática de literatura donde se identificaron los principales aportes y tendencias de investigación en el área. Como aporte académico relevante en esta fase de la investigación, se desarrolló una clasificación taxonómica de dos niveles del problema de modelado analítico de la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro. Los aportes realizados hasta el momento se pueden clasificar en siete categorías principales: tipo de modelo, objetivo, herramienta aplicada, mecanismo de coordinación/integración, función objetivo, características de los datos y horizonte de tiempo. Se probó la necesidad de desarrollar modelos analíticos que consideraran simultáneamente el comportamiento de las variables de estado de la gestión de calidad al interior de tres etapas fundamentales de la cadena de suministro y su efecto sobre el desempeño global.

El objetivo específico 2 -determinar los elementos de un modelo analítico para la coordinación e integración de la gestión de la calidad en el contexto de las cadenas de suministro- se logró teniendo como referentes los resultados de la revisión sistemática de

literatura. Dado que el problema del modelado analítico de la gestión e la calidad en cadenas de suministro es un área de estudio relativamente nueva, es adecuado en estas fases iniciales el uso de técnicas de modelado basadas en conceptos e interrelaciones que representen el sistema. El modelado con mapas cognitivos grises difusos permitió configurar el sistema en variables y sus interrelaciones agrupadas por etapa de la cadena de suministro, estas etapas se conectan e interactúan con una capa principal que representa el sistema global de gestión de la calidad en cadenas de suministro.

Con el uso del enfoque de modelado con mapas cognitivos grises difusos multi-capas fue posible el logro del objetivo específico 3 -elaborar un modelo analítico para la gestión de la calidad en cadenas de suministro integrando técnicas de modelado multi-etapas. Los elementos del modelo determinados en el objetivo anterior fueron configurados en una estructura de mapas cognitivos difusos con dos capas, una capa principal que representó el desempeño global de la gestión de la calidad en cadenas de suministro y una segunda capa donde se expanden los conceptos de las tres etapas de la cadena de abastecimiento a través de submapas. En el modelo elaborado se representan las fortalezas de las relaciones entre conceptos usando valores grises que permiten incorporar la incertidumbre propia del sistema estudiado.

La validación del modelo propuesto a través de técnicas apropiadas, con el fin de establecer su adecuación a la complejidad de actores y elementos de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, en comparación con los modelos tradicionales (objetivo específico 4) se realizó a través de análisis estático y dinámico. En el análisis estático se validó la complejidad estructural de los grafos resultantes del modelo. Se calcularon los índices de densidad de cada mapa, resultando en un rango de complejidad media-alta que confirmó la adecuada escogencia del número de variables e interrelaciones.

La validación del desempeño dinámico del modelo desarrollo se llevó a cabo realizado los experimentos de simulación integrados con base en arreglos experimentales de diseños factoriales fraccionados. La aplicación del diseño factorial fraccionado validó el adecuado funcionamiento dinámico del modelo y permitió identificar los factores que tienen efecto significativo sobre la variable respuesta en cada mapa. En el modelo desarrollado, el 93.2% de los factores son significativos en cuanto al uso requerido de valores grises en vez de valores concretos de las interacciones de las variables.

La sumatoria de las contribuciones anteriores constituyen el sustento del logro del objetivo general de la investigación: se desarrolló un modelo analítico multi-etapas para la coordinación e integración de la gestión de la calidad en cadenas de suministro el cual supera el enfoque de los modelos descriptivos tradicionales, dado que se utilizaron técnicas basadas en reglas de inferencia que modelan la interacción de las variables. De igual manera, los conceptos seleccionados en cada etapa y en el desempeño global, son variables de estado y variables respuesta específicas de la gestión de la calidad en cadenas de suministro.

## **5.2 Recomendaciones**

La metodología de modelado analítico de la gestión de la calidad en cadenas de suministro desarrollada en esta investigación tiene un esquema flexible y adaptable a las condiciones particulares de cadenas de suministro o sectores específicos. Para su aplicación en un contexto dado es fundamental disponer de información histórica que permita extraer conocimiento de la fortaleza de las interrelaciones de las variables usando análisis estadístico descriptivo multivariado.

El enfoque de modelado utilizado en esta investigación se centra en el análisis de la fortaleza de la interacción de las variables como evidencia de la coordinación e integración de la gestión de la calidad en la cadena de suministro. Por ello, no es posible obtener un modelo matemático que permita predecir el valor del resultado real de la variable respuesta. Sin embargo, sí permite establecer posibles grados de impactos de los cambios hechos en una variable con respecto a otras variables de estado o respuesta.

Finalmente, es de resaltar que el modelo está desarrollado bajo un enfoque genérico que hace posible su generalización y/o adaptación a cadenas de suministro específicas. Para su generalización, se recomienda incorporar elementos de modelado adicionales en la estructura multi-capas donde se reflejen variables como el nivel de madurez de la gestión de la calidad en cadenas de suministro, tipologías de las organizaciones, estrategias de negociación, estrategias de fabricación, entre otros. Para su aplicación en una cadena específica, se recomienda un enfoque vertical donde participen todas las áreas responsables de la gestión de operaciones de la organización focal y un enfoque horizontal

para la integración de todos los socios de la cadena incorporando las características endógenas de cada uno de ellos.

### **5.3 Trabajos futuros**

Los resultados de esta investigación sirven como punto de partida para futuras investigaciones en el área del modelado analítico y temas relacionados con la gestión de la calidad en cadenas de suministro. Es de interés en etapas posteriores integrar otras técnicas de analítica o captura de datos en tiempo real para alimentar módulos de indicadores de desempeño en calidad en los sistemas de información empresariales.

La integración de técnicas de optimización y explorar el funcionamiento de otros algoritmos de aprendizaje constituyen otra línea de investigación. Finalmente, otra línea derivada e identificada en el proceso investigativo es el desarrollo de modelos de simulación y optimización para el diseño y ejecución de estrategias de recogida de productos defectuosos o inseguros en el mercado.



## **A. Anexo: Paper 1**

Cogollo-Flórez, J. & Correa-Espinal, A. (2019). Analytical modeling of supply chain quality management coordination and integration: A literature review. *Quality Management Journal*, 26 (2), 72-83. DOI: 10.1080/10686967.2019.1580553.

## Analytical modeling of supply chain quality management coordination and integration: A literature review

Juan M. Cogollo-Flórez<sup>a</sup> and Alexander A. Correa-Espinal<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Instituto Tecnológico Metropolitano – ITM, Medellín, Colombia; <sup>b</sup>Facultad de Minas, Departamento de Ingeniería de la Organización, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

### ABSTRACT

Development of analytical models on coordination and integration of quality management in the supply chains context is an ongoing research avenue. The purpose of this paper is to identify the main contributions, model types, applied tools, and research trends on analytical modeling of supply chain quality management (SCQM) coordination and integration. This paper develops a comprehensive literature review and a taxonomical classification on the studies published from 2000 to 2018, which proposed analytical models for SCQM coordination and integration. The pending issues to be solved in analytical modeling of SCQM coordination and integration are focused on how to develop dynamical models that incorporate a greater number of factors and agents of the supply chains. The new models to be proposed should consider multiple products, time periods, supply chain levels, and adequate performance indicators and objective functions, which allow analyzing how quality management practices affect the supply chain overall performance.

### ARTICLE HISTORY

Received 20 December 2018  
 Accepted 4 February 2019

### KEY WORDS

coordination; integration; modeling; supply chain quality management; taxonomy

### Introduction

Supply chain management (SCM) involves the management of assets and product, services, information, and funds flows to maximize total supply chain profitability (Chopra and Meindl 2016). The SCM body of knowledge has evolved by integrating new approaches and concepts like quality management (Foster 2013). Thus, supply chain quality management (SCQM) refers to the strategies used by a focal company to coordinate and/or integrate with suppliers and customers for quality improvement (Ford 2015). In the literature, there are some theoretical contributions about SCQM (Kuei and Madu 2001; Carmignani 2009; Sharma, Garg, and Agarwal 2012; Xu 2011; Fish 2011), but there is a lack of research on how to incorporate quality requirements in designing and planning global supply chains and how to model this system using analytical modeling techniques (Cogollo-Flórez and Correa-Espinal 2018).

The growing globalization and competition of marketplaces generates a need for managing global supply chains with suppliers located in different continents and even with companies that operate under offshoring production systems in two or more continents. Although product quality and safety are considered as

overcome issues by applying the current standardization and audit systems (Montoya Quintero and Cogollo-Flórez 2018), in recent years there have been frequent events of recalls due to safety and/or quality failures in automotive, toy, computer, and electronic equipment manufacturers (Flynn and Zhao 2015). This demonstrates a need to continue researching mechanisms and strategies of SCQM.

Evans, Foster, and Linderman (2014) carried out a study on the content and research trends in quality management and established that current avenues of research are focused on the development of mathematical models, global contingency analysis, supply chain quality, information technologies, and strategic benefits. The authors also stated that few works have been developed that study quality performance in the supply chain, how cooperation can lead to better quality performance, and the relationships between supplier selection and quality.

On the other hand, analytical modeling of a system (such as SCQM) may use two approaches for the construction of scientific models: descriptive modeling and rule-based modeling. Descriptive modeling is static and consists of describing the real state of a system at any time using quantitative methods (for

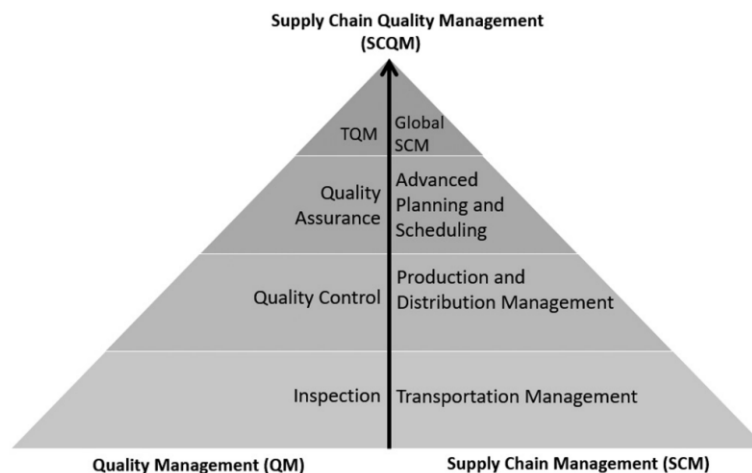


Figure 1. The supply chain quality management (SCQM) concept and its foundations.

example, regression analysis and pattern recognition). Rule-based modeling consists of formulating dynamic rules that explain the behavior observed in a system and allows making predictions of possible states of the system using dynamic equations, rules, and principles, among other quantitative methods (Sayama 2015).

Therefore, the objective of this paper is to provide a comprehensive literature review on the studies published from 2000 to 2018 that propose analytical models for SCQM coordination and integration in order to identify the main contributions, analytical modeling techniques used, and research trends in the area. This paper is structured as follows. First, there are backgrounds about SCQM and SCQM coordination and integration. Then, the authors describe the stages of the methodology used for the literature review on analytical models for SCQM coordination and integration. Lastly, the authors show the results analysis and the conclusions.

### Supply chain quality management background

SCQM can be stated as the integration of SCM and quality management concepts, and it is a result of their evolution from an operational to a strategic approach (see Figure 1). At beginning, quality was achieved by inspecting articles to identify defects before they reached the market. Then, the quality control concept overcame the error detection approach and developed a more systematic approach for solving quality problems by applying statistical techniques. Quality assurance expanded the responsibility for quality to organizational functions other than operations by using

more sophisticated statistical techniques (Arteaga Sierra et al. 2017). Total quality management (TQM) made quality both a strategic and widespread issue in the organization involving both customers and suppliers (Evans, Foster, and Linderman 2014; Slack, Brandon-Jones, and Johnston 2016; Cogollo-Flórez and Correa-Espinal 2017; Zimon 2017).

On the other hand, the first stage of SCM was the logistics research based on transportation management by developing intermodal containers and carriers. Then, it was necessary to jointly consider warehousing, materials handling, and freight transportation, and the concept of production and distribution management emerged, which was supported by computerization advances for optimizing warehousing, inventory, and truck routing. The emergence of enterprise resource planning (ERP) systems allowed the integration of multiple databases and improvement of data availability and accuracy for planning and integrating logistics operations, which was known as advanced planning and scheduling. Today, SCM is associated with strategic problems related to the current trends of market globalization, such as coordination of complex supply networks due to global sourcing, making decisions about outsourcing or offshoring, product recall, social responsibility, and others (Cooper, Lambert, and Pagh 1997; Wieland, Handfield, and Durach 2016; Cruz Trejos, Correa Espinal, and Cogollo Florez 2012; Narasimhan, Venkatasubbaiah, and Avadhani 2013).

Kuei and Madu (2001) used three equations to outline a SCQM definition: SC = production-distribution network; Q = to meet market demands and to achieve customer satisfaction in a fast and cost-effective way,

and M=to improve the conditions and the confidence for supply chain quality. Robinson and Malhotra (2005) describe SCQM as “the formal coordination and integration of business processes involving all partner organizations in the supply chain to measure, analyze and continually improve products, services and processes in order to create value and achieve satisfaction of intermediate and final customers in the marketplace.”

Foster (2008) referred to SCQM as a systems-based approach to improve performance, taking advantage of opportunities provided by linkages between suppliers and customers. Mellat-Parasat (2013) described SCQM is the coordination and integration of intercompany processes involving all supply chain members through continuous improvement of interorganizational processes in order to improve the performance and achieve customer satisfaction by emphasizing cooperative learning. Flynn and Zhao (2015) described six key SCQM elements and proposed a definition based on these elements. These authors proposed SCQM as “a holistic management system to improve quality in a supply chain, which includes supply chain leadership for quality, strategic supply chain design for quality, upstream quality management system, downstream quality management system, internal quality integration, and product recall strategy.”

Based on this information, in the SCQM context, it is necessary to differentiate the concepts of collaboration, coordination, and integration. Based on cooperative intensity, collaboration may be considered as more intense and includes coordination and integration characteristics. Collaboration refers to working together or with someone aimed to a special purpose (Montoya-Torres and Ortiz-Vargas 2014). In collaborative supply chains, all members must implement the agreed-upon strategies, regardless of their size, function, or position within the chain (Montoya-Torres and Ortiz-Vargas 2011). Coordination refers to an active and direct cooperation, and it is carried out by sending the correct signals or sharing the correct information and the same policies. It implies a joint interactive process that leads to joint decisions and activities (Moharana et al. 2012).

Integration refers to “making a whole, gathering its constituent parts,” that is, synchronizing requirements, concepts, and flows of the chain members aimed to maximize competitive advantages at strategic, tactical, and operative levels (Bautista-Santos et al. 2015). Thus, in this paper the authors consider SCQM coordination as the quality management practices aimed to improve supply chain overall

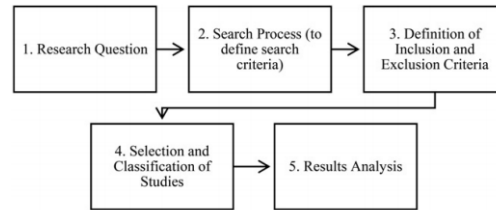


Figure 2. Stages of the methodology used for the literature review.

performance and the SCQM integration as development of a single point of view (a common language) in all supply chain members to synchronously manage issues related to quality management.

## Methodology

A systematic literature review was performed to identify the most important contributions that have been made concerning analytical modeling for SCQM coordination and integration over the last 18 years. The methodology allowed the authors to seek, identify, interpret, and synthesize the documented evidence in the time period of 2000 to 2018, answer the research questions, and also identify research topics according to a rigorous and objective scheme (see Figure 2).

## Research question

Considering the importance of supply chain design and evaluation focused on quality, it is necessary to identify how quality management may be coordinated and integrated in the SCM context. Specifically, it is necessary to identify the analytic models for SCQM coordination and integration. To do this, the following research question was formulated:

- RQ: What analytical models for SCQM coordination and integration were proposed in the period between 2000 and 2018?

## Search process

The search process was carried out considering the papers published in serial and indexed journals for the period between 2000 and 2018. The search was performed considering a compendium of the following databases: Science Direct, IEEE, Springer, Taylor & Francis, and Emerald.

The following search criteria were established under the next configuration: TITLE-ABSTR-KEY

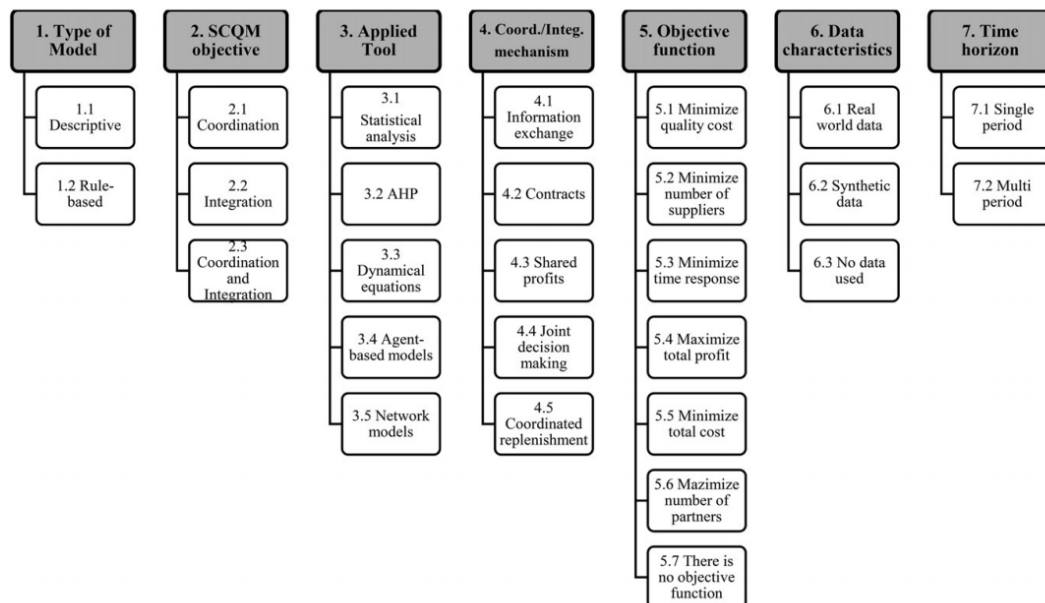


Figure 3. Taxonomy of analytical modeling of SCQM coordination and integration.

(XX) AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR AFT 2000, using the next key words in titles and abstracts: “Supply chain quality management” AND modeling, “Supply chain quality management” AND modeling, “Supply chain quality management” AND analytical model, “Supply chain quality management” AND coordination, “Supply chain quality management” AND coordinating, “Supply chain quality management” AND integration, “Supply chain quality management” AND integrating, and “Supply chain quality management” AND analysis. By applying these search criteria and considering the selected databases, 429 publications were obtained.

#### Inclusion and exclusion criteria

The selection of the documented evidence concerning the topic of interest in the research was carried out considering two inclusion criteria: 1) it presents a model for SCQM analysis; and 2) it presents an analytical model for SCQM coordination and integration. Moreover, the papers that met any of the following characteristics (exclusion criteria) were excluded: 1) it presents theoretical development on quality management in individual companies; and 2) it presents theoretical development on SCM without considering quality management.

#### Selection and classification of studies

The 429 publications obtained in the search process were analyzed by applying the above inclusion and exclusion criteria, and 26 papers were selected. To represent a wide spectrum of the research area (analytical modeling of SCQM coordination and integration), the 26 selected papers were classified using a taxonomical approach (Reisman 2004), as shown in Figure 3. The taxonomy has two classification levels (categories and subcategories), which were determined after reading and analyzing the selected papers. The first level is composed of the following categories: 1) type of model; 2) SCQM objective; 3) applied tools; 4) coordination/integration mechanism; 5) objective function; 6) data characteristics; and 7) time horizon.

Within every category, a paper is characterized based on its content and whether it fits one (or more than one, in some cases) of the subcategories presented. The first category, type of model, comprises the main classification of each paper and is taken from the work of Sayama (2015) to classify scientific models. After identifying the type of model, the SCQM model objective (coordination and/or integration) is distinguished in the second category. The third category, applied tools, consists of the modeling tools or techniques used in each study. The fourth category, coordination/integration mechanism, comprises those required managerial practices necessary



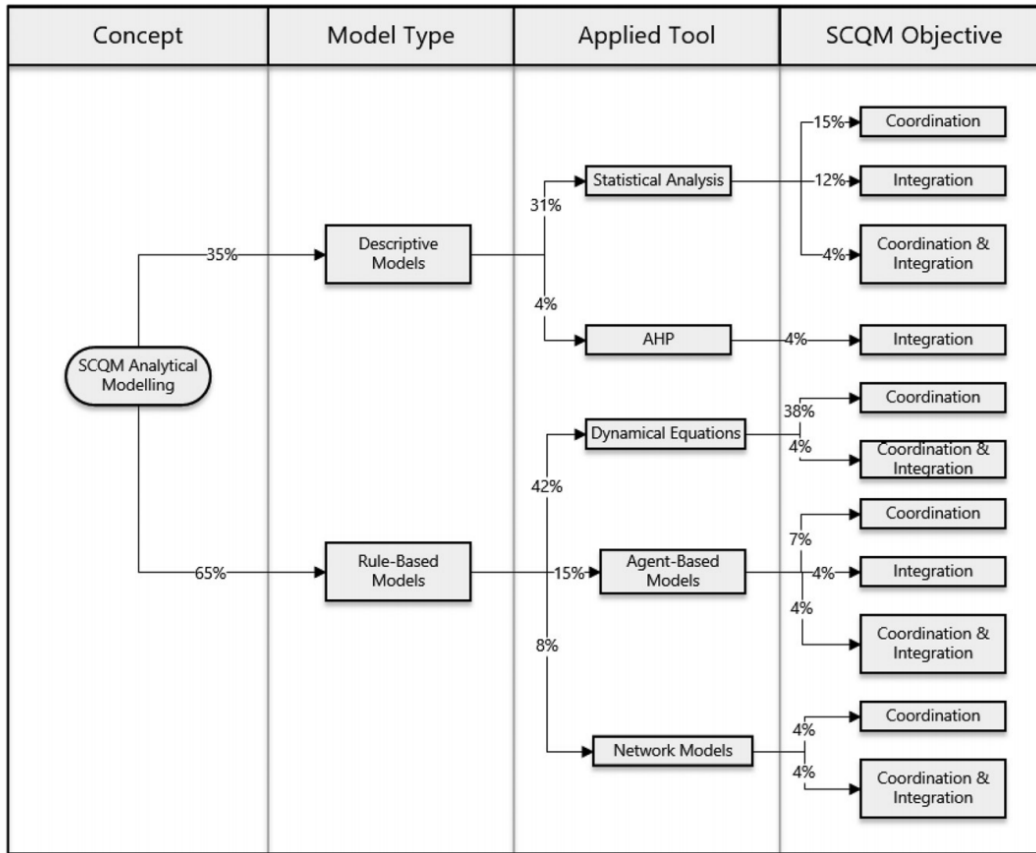


Figure 4. Profile of the analytical models for SCQM coordination and integration according to selected papers.

for SCQM coordination and/or integration to be effective. The fifth category, objective function, deals with the solution of the mathematical model presented by identifying one or more objective functions. In this category, there is the subcategory “there is no function objective,” which is characteristic mainly of the descriptive models. The sixth category, data characteristics, analyzes whether the model is applied using real-world or synthetic data; there are also models that are conceptual proposals and are not applied using data. The last category, time horizon, refers to whether the model results are static or dynamic over the time.

**Results analysis**

The results analysis is based on the answers to the research question previously asked: the analytical models for SCQM coordination and integration proposed in the period between 2000 and 2018. The

profile of the analytical models for SCQM coordination and integration proposed over the last 18 years is shown in Figure 4. This profile is based on categories 1, 2, and 3 of the taxonomy developed in Figure 3 and shows the percentage of selected papers that meet each of the categories used.

In addition, the taxonomy was applied to classify each of the 26 selected papers and fit them into the respective categories and subcategories (see Table 1). The fulfillment of the attributes of each subcategory is marked with an “X” in the respective cells. It is noted in Table 1 there are no blank columns. The subcategories marked only once constitute 18.5 percent, the subcategories marked two or three times become 3.7 percent each. Thus, 74.1 percent of the subcategories are marked four or more times, which can attest that the developed taxonomy is robust to concisely classify the selected papers of the literature about analytical modeling of SCQM coordination and integration.



Of the 26 selected papers, nine (35 percent) showed development and/or application of descriptive models for SCQM coordination and integration (see Figure 4), applying statistical analysis techniques like multivariate correlation analysis, confirmatory factor analysis, cluster analysis, and main components analysis. On the other hand, 17 papers (65 percent) showed rule-based models, applying mainly dynamical equations and agent-based modeling. This demonstrates the growing interest in the development of rule-based models for SCQM coordination and integration, because most studies with this model type (58 percent of the selected papers) have been published over the last 10 years. Regarding the SCQM model objectives (coordination and/or integration), most of the papers (50 percent of the selected papers) showed rule-based models for SCQM coordination, 4 percent for SCQM integration, and 12 percent for SCQM coordination and integration.

The coordination and/or integration mechanisms most used in the analyzed models are joint decisions making (54 percent of the papers), information exchange (35 percent of the papers), and contracts (31 percent). It is noteworthy that in 40 percent of cases at least two simultaneous mechanisms are used, which indicates that a single mechanism would not be sufficient to ensure the effective coordination and integration of SCQM.

In relation to the objective functions, 42 percent of the models have no objective function, because they do not aim to solve an optimization problem but rather to establish the association degree between SCQM coordination and integration variables. Otherwise, the main objective functions are to maximize total profit (35 percent of the papers) and minimize quality cost (23 percent of the papers). Therefore, the need to develop models with more suitable objective functions to SCQM coordination and integration is evident.

Most models are applied using synthetic data (54 percent), and only 31 percent are applied using real world data, so the requirement for developing more SCQM models with real applications is evident. Regarding the time horizon, most models (81 percent) obtain results applicable to a single period, and only 19 percent of the models are multi-period. Therefore, this latter subcategory constitutes another research avenue in the dynamic, uncertain context of the current global supply chains.

Regarding the main characteristics, the constraints that are considered, and the assumptions that are made by the studied models, it is worth noting that

contributions have been made to the predictive analytical modeling of SCQM, which, although they overcome the merely descriptive approach, present some shortcomings or research opportunities. The following paragraphs detail the main contributions identified in the papers classified in the taxonomy of analytical modeling of SCQM coordination and integration (see Table 1) and the identified flaws that constitute the starting point to develop future research in this knowledge area.

### **Descriptive models**

These studies are based primarily on analysis of the perceptions of the interviewees and not on the analysis of direct evidence. Thus, Narasimhan and Nair (2005) proposed a structural equations model to test the role of quality considerations from suppliers, information sharing and trust, and supply chain proximity associated with relationship architecture on strategic alliance formation and supply chain performance. The model was applied by surveys using a five-point Likert scale, and the hypotheses research were analyzed using confirmatory factor analysis to validate measures of constructs.

Mendes Dos Reis (2011) developed a model for the alignment of product type (functional or innovative), network strategy (agile, fast, flexible, or lean) and the quality management system (by policy, TQM, Six Sigma, or ISO 9001). The model uses structural equations for modeling coordination and integration between product management and the quality management system. Bayo-Moriones, Bello-Pintado, and Merino-Díaz-de-Cerio (2011) carried out an empirical study about the association between suppliers' geographic locations and quality assurance practices, through a survey conducted in manufacturing plants. They proposed and tested ordered probit models for the internal quality assurance variable and ordinary least square models for the external quality assurance practices index. This model does not define mediating variables between supplier localization and quality assurance practices because of its static, descriptive characteristic.

Also, Kuei, Madu, and Lin (2011) proposed a structure for SCQM integration by using analytic hierarchy process (AHP) and adopting three distinct groups of variables: a hierarchy of design variables, a hierarchy of system variables, and a hierarchy of problem-solving methods. Wu et al. (2013) proposed an SCQM coordination model of large complex projects. The model may improve the economy of quality



management, customer satisfaction, and the harmonious construction process.

Fernandes, Sampaio, and Carvalho (2014) proposed a conceptual model for the integration of quality management and supply chain management. This model can be validated through case studies using structural equations based on surveys answered by specialists in TQM and SCM. Chaghooshi, Soltani-Neshan, and Moradi-Moghadam (2015) proposed a correlational descriptive model to analyze the relationships between SCQM and competitive advantage, using canonical correlation analysis. Huo et al. (2019) developed a supply chain quality integration (SCQI) framework based on a global database collected from 10 countries. The authors developed an SCQI taxonomy and established constructs and related measurement items. The survey results were analyzed by applying correlation analysis, confirmatory factor analysis, cluster analysis, and canonical discriminant, to identify SCQI patterns and their effects on quality-related performance. Although this study is a contribution to SCQM literature and practice, it can be expanded by introducing more mediators and moderators, including strategic and operational decision-making levels and using longitudinal data to obtain causal inferences between SCQI and global performance.

Finally, Zhang et al. (2019) developed a model to investigate the effects of mass customization and product modularity on SCQI and the impact of SCQI on competitive performance. Structural equation modeling was used to prove the constructs, using data from surveys to global manufacturers. The constructs were measured using seven-point Likert-type scales, and the results were analyzed by applying correlation analysis and confirmatory factor analysis. According to this, mass customization is an enabler for a manufacturer to integrate with suppliers and customers on quality management, and it improves internal, supplier, and customer quality integration. Since this model only focuses on product modularity, it would be necessary to examine the joint effects of product and process modularity on SCQI and to consider business environments and other production systems.

### **Rule-based models**

#### ***Dynamical equations models***

The dynamical equations models consider how the states of components change over time through their interactions with other nodes that are connected to them. Cheung and Leung (2000) developed a mathematical model for coordinated replenishment

considering inventory control and quality control problems in items, using policy (Q, S). Although it is one of the first contributions to the joint analytical modeling of inventory control and quality control (quality costs dependent on the costs of the acceptance sampling plans), it only considers two items, and the cost savings obtained by applying the model are greater considering inventory costs than considering quality costs.

Tsai and Wang (2004) proposed a model of collaborative quality control in the semiconductor industry, considering practices and protocols to ensure quality of outsourced and offshored processes. Das and Sengupta (2010) proposed a mathematical model for designing supply chains considering that suppliers are recruited with appropriate contractual agreements and quality assurance systems. The model does not directly incorporate the elements of quality management of suppliers in supply chain optimization, since the supplier affiliation model (based on quality indexes) is independent of the supply chain optimization model. That is, it does not contain performance indicators and objective functions suitable to SCQM, different from traditional ones focused on the cost or activity level.

Su and Liu (2011) developed a SCQM coordination model by contracts and information exchange, considering external failure sharing in a supplier-manufacturer supply chain. Xiao, Yang, and Shen (2011) developed a mathematical model of supply chain coordination with a quality assurance policy based on shared profit contracts in make-to-order (MTO) environments. However, the model does not consider the effect of competition on coordination mechanisms and assumes the cost of the manufacturer's lead time is zero, which does not reflect the reality of many manufacturers, particularly in massive consumption products or that are not MTO type.

Yoo (2014) developed a coordination model between return policies and product quality decisions in a two-link supply chain. The buyer defines the return policy, and the supplier makes product quality decisions. The model only analyzes the relationship between quality decisions and the return policy, without considering other elements or objectives such as overall performance, customer satisfaction, and total costs, among others. Gao et al. (2016) developed a two-stage decentralized supply chain quality improvement coordination model, with a partial cost allocation contract (penalty contract) and considering that the supplier elaborate defective products. However, the model assumes exogenous (not sensitive to the

product quality) and deterministic demand, so it does not incorporate in analytical modeling the effect of product quality on the demand behavior.

Modak, Panda, and Sana (2016) proposed a hybrid contract model for coordinating a retailer and a manufacturer in a supply chain, considering a random proportion of items with imperfect quality. In this model, the price of the items has a linear behavior, depending on the demand, and is based on a sequential negotiation in two stages. The model does not reflect the supply chain complexity, since it is limited to two links, and its applicability to plan, coordinate, and execute the data analysis related to product quality at multiple levels of the supply chain is not verified. The effect of offshoring and outsourcing on global supply chains is not considered either.

Masoudipour, Amirian, and Sahraeian (2017) developed a mixed integer nonlinear model for a closed-loop supply chain considering return rates of backward chain by proposing a quality-based returns policy. The model is suitable to industries with zero-waste strategy and similar recovery facilities. The application results stated an increase in the rate of returns with low/medium quality leads to higher profits since they open more business opportunities. However, the model considers only a single period and one type of product, without uncertainties in demands, costs, and prices.

Pang and Tan (2018) proposed a model for making quality decisions of a single product in a supply chain with a supplier and two competing manufacturers. The model examines the optimum quality strategies under different cooperative mechanisms and investigates its effects on channel members profits. Finally, Sarkar et al. (2018) proposed a single-vendor multi-buyer supply chain model with variable production rate and imperfect quality of products; three different production functions are established to relate process quality and production rate. The model has a special type of quality function and inspection under a two-echelon manufacturing supply chain model. The model would be extended by considering a multi-echelon supply chain model with multi-item product and inspection errors.

#### *Agent-based models*

Agent-based models are computational simulation models that involve many discrete agents, where agent behavioral rules are described in an algorithmic fashion rather than a purely mathematical way. This allows implementing complex internal properties of agents and their nontrivial behavioral rules (Sayama 2015).

Kuei, Madu, and Winch (2008) evaluated the effects of the supply chain critical factors on quality and speed, through a simulation model considering the operation's effectiveness, uncertainty in the demand, speed of the supply chain, and quality and distribution aspects. The simulation study aimed to overcome the limitations of empirical studies, which are usually based on perceptions of the respondents and not on the system's actual behavior. In this simulation study, the links between critical quality factors in the supply chain and their influence on performance of lead-time and cost of nonconformities were demonstrated.

Lou et al. (2009) developed a distributed cooperative quality management based on a multi-agent system for a cooperative quality management architecture in supply chains, with production and outsourcing. The incentive mechanism is based on information exchange and shared profits. The architecture was built by a combination of both Web service technology and multi-agent technology. The architecture has six levels: business application layer, Web service layer, function entity layer, ontology, communication layer, and transport layer. The quality agents construct a quality management cycle over the communication layer according to the quality management mode to continuously improve quality.

Sun and Li (2010) proposed a SCQM model based on immune theory by analyzing the mechanisms and functions from four aspects: recognition, learning, memory, and effects. Since SCQM uses constrained resources of supply chain partners to identify quality variability, maintain product quality, and ensure the final product meets customer requirements, the authors consider that there are many similarities between immune theory and SCQM, especially in openness, multiformity, complexity, distributivity, self-organization, and robustness. Although this model presents a novel approach for SCQM modeling, it does have limitations, such as the lack of a quantitative study of the immune system's components in SCQM and a lack of application of the artificial immune algorithm.

Finally, Romero et al. (2012) developed a collaborative model for solving problems adapted to SCQM, considering strategic decisions in product development. The proposed modeling methodology includes two strategic activities: system design process and supplier selection. These two phases allow highlighting some concrete links existing between quality management practices and the new products rollout in the SCM context. Like the study in the previous

paragraph, this model requires a quantitative application with data of a specific supply chain.

### Network models

Network models are based on a set of network layers and how they interact, and are one of the most recent developments of complex systems modeling. Their historical roots are discrete mathematics and statistical physics (Sayama 2015). In this area, Yan et al. (2010) proposed an ontology of collaborative supply chain. It provides a foundation for the coordination and integration of the business process to measure, analyze, and continually improve the quality of products, services, and processes. The foundations of SCQM in this ontology are captured in four key based classes: role class, goal class, operant resource class, and operand resource class. Although this ontological perspective provides a foundation for SCQM coordination and integration, it is necessary to complement it with other quantitative modeling techniques to measure the internalization degree of quality management practices along the supply chain.

Liu et al (2012) developed a Petri net model for SCQM conflict resolution of a complex product. It allows making decisions to select the appropriate activities when a quality conflict has happened. The Petri net for conflict analysis (PNCA) contains transition and preference labels to describe decisions makers activities and profit comparisons. In addition, a case study on an aircraft production system was conducted to demonstrate the feasibility and effectiveness of the model. Even if the model is able to help decision makers choose appropriate SCQM activities, it is necessary to improve its performance by considering and evaluating uncertainty in decision making.

### Conclusions

In this paper, the authors analyzed the studies published from 2000 to 2018 that proposed analytical models for SCQM coordination and integration to identify the main contributions, analytical modeling techniques used, and main research avenues. The taxonomical classification developed in this paper is a novel approach in SCQM study, and it can be improved in the future by considering new categories and subcategories as the body of knowledge of SCQM modeling increases.

Most of the models analyzed for SCQM coordination and integration are applied only in manufacturing companies and to a single product or product line. They emphasize only one side of the supply chain

(suppliers or distributors) and consider a maximum of two links. The pending issues to be solved in the analytical modeling of SCQM coordination and integration are focused on the need to incorporate a greater number of factors and agents, so the resulting model stands for the supply chain's breadth and complexity.

Based on this information, the need for developing predictive analytical models for the coordination and integration of quality management in the supply chains context is evident. The new models should consider multiple products, time periods, and levels of the supply chain, with performance indicators and adequate objective functions, which allow analyzing how quality management practices affect the overall performance of the supply chain. Also, it allows one to establish coordination and integration strategies with suppliers and customers to improve the performance of the supply chain and analyze how the supply chain management approach affects quality of products and services and, in general, establish the key conditions for proper quality management in the supply chains context.

This paper is the result of the initial step of ongoing doctoral research aimed at developing an analytical model for SCQM coordination and integration using a multistage modeling approach, in order to overcome the gaps identified and related to lack of predictive analytical models considering multiple products and supply chain levels. The next steps will be focused on determination of model levels and agents and their coordination and integration strategies.

### About the authors

*Juan M. Cogollo-Flórez* is a professor in the Department of Quality and Production, Instituto Tecnológico Metropolitano-ITM, Medellín, Colombia. He received a master's degree in management engineering in 2011 from the Universidad Nacional de Colombia. He is currently a doctoral student in engineering - industry and organizations at Universidad Nacional de Colombia. His current research interests are performance measurement, supply chain quality management and advanced statistical quality control.

*Alexander A. Correa-Espinal* is a full professor in the Department of Organizational Engineering, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. He received a doctorate in statistics and operational research in 2007 from the Universitat Politècnica de Catalunya (Spain) and the master's degree in industrial engineering in 1999 from the Universidad de los Andes (Colombia). His current research interests are advanced design of experiments, advanced statistical quality control, and total quality management.



## References

- Arteaga Sierra, M., M. Cogollo Flórez, J. Cogollo Flórez, and A. Flórez Rendón. 2017. Optimal estimation of process capability indices with Non-Normal data and inaccurate parameters using metaheuristics. *Quality - Access to Success* 18 (161):73–9.
- Bautista-Santos, H., L. Martínez-Flores, G. Fernández-Lambert, M. B. Bernabé-Loranca, F. Sánchez-Galván, and N. Sablón-Cossío. 2015. Integration model of collaborative supply chain. *Dyna* 82 (193):145–54. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n193.47370>.
- Bayo-Moriones, A., A. Bello-Pintado, and J. Merino-Díaz-de-Cerio. 2011. Quality assurance practices in the global supply chain: The effect of supplier localisation. *International Journal of Production Research* 49 (1): 255–68. doi: 10.1080/00207543.2010.508953.
- Carmignani, G. 2009. Supply chain and quality management: The definition of a standard to implement a process management system in a supply chain. *Business Process Management Journal* 15 (3):395–407. doi: 10.1108/14637150910960639.
- Chaghooshi, A. J., M. Soltani-Neshan, and M. Moradi-Moghadam. 2015. Canonical correlation analysis between supply chain quality management and competitive advantages. *Foundations of Management* 7 (1):83–92. doi: 10.1515/fman-2015-0027.
- Cheung, K. L., and K. F. Leung. 2000. Coordinating replenishments in a supply chain with quality control considerations. *Production Planning and Control* 11 (7):697–705. doi: 10.1080/095372800432160.
- Chopra, S., and P. Meindl. 2016. *Supply chain management: Strategy, Planning, and operation*. 6th ed. New York: Pearson.
- Cogollo-Flórez, J., and A. Correa-Espinal. 2017. Supply chain quality management: Developments and trends. *Espacios* 38 (37):16–38.
- Cogollo-Flórez, J., and A. Correa-Espinal. 2018. Rule-Based Modeling of Supply Chain Quality Management. In *Proceedings of the international conference on modeling and applied simulation 2018*, edited by A. Bruzzone, F. De Felice, C. Frydman, F. Longo, M. Massei, and A. Solis, 120–25. Budapest, Hungary.
- Cooper, M., D. Lambert, and J. Pagh. 1997. Supply chain management: More than a new name for logistics. *The International Journal of Logistics Management* 8 (1):1–14. doi: 10.1108/09574099710805556.
- Cruz Trejos, E., A. Correa Espinal, and J. Cogollo Florez. 2012. Supply chain social responsibility. *Gestión y Región* 13:89–106.
- Das, K., and S. Sengupta. 2010. Modelling supply chain network: A Quality-Oriented approach. *International Journal of Quality & Reliability Management* 27 (5):506–26. doi: 10.1108/02656711011043508.
- Evans, J. R., S. T. Foster, and K. Linderman. 2014. A content analysis of research in quality management and a proposed agenda for future research. *Quality Management Journal* 21 (2):17–44. doi: 10.1080/10686967.2014.11918383.
- Fernandes, A., P. Sampaio, and M. Carvalho. 2014. Quality management and supply chain management integration: A conceptual model. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 773–80. Bali, Indonesia.
- Fish, L. A. 2011. *Supply Chain Quality Management. In Supply chain Management - Pathways for research and practice*, edited by D. Önkal and E. Aktas, 25–42. Rijeka: InTech.
- Flynn, B., and X. Zhao. 2015. *Global supply chain quality management: Product recalls and their impact*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ford, M. W. 2015. Supply chain quality management and environmental uncertainty: A contingency perspective. *Quality Management Journal* 22 (4):54–65. doi: 10.1080/10686967.2015.11918450.
- Foster, S. T. 2013. *Managing quality: Integrating the supply chain*. 5th ed. New Jersey: Pearson.
- Foster, S. T. 2008. Towards an understanding of supply chain quality management. *Journal of Operations Management* 26 (4):461–7. doi: 10.1016/j.jom.2007.06.003.
- Gao, C., T. C. Cheng, H. Shen, and L. Xu. 2016. Incentives for quality improvement efforts coordination in supply chains with partial cost allocation contract. *International Journal of Production Research* 54 (20):6213–31. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1191691>.
- Huo, B., Y. Ye, X. Zhao, and K. Zhu. 2019. Supply Chain Quality Integration: A Taxonomy Perspective. *International Journal of Production Economics* 207: 236–46. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.004>.
- Kuei, C.-H., and C.-N. Madu. 2001. Identifying critical success factors for supply chain quality management (SCQM). *Asia Pacific Management Review* 6 (4):409–23. <https://doi.org/10.4018/jds.2010070104>.
- Kuei, C.-H., C.-N. Madu, and C. Lin. 2011. Developing global supply chain quality management systems. *International Journal of Production Research* 49 (15): 4457–81. doi: 10.1080/00207543.2010.501038.
- Kuei, C.-H., C.-N. Madu, and J. Winch. 2008. Supply chain quality management: A simulation study. *Information and Management Sciences* 19 (1):131–51.
- Liu, Y., S. Fang, Z. Fang, and K. Hipel. 2012. Petri net model for supply-chain quality conflict resolution of a complex product. *Kybernetes* 41 (7/8):920–8. <https://doi.org/10.1108/K-01-2015-0009>.
- Lou, P., Q. Liu, Z. Zhou, and S. Quan. 2009. Production-outsourcing supply chain quality management based on multi-agent system. In *Proceedings of the 16th international conference on industrial engineering and engineering management, Industrial Engineering and Engineering Management Beijing, China*. Romero: Information management and evaluation. 1555–1559.
- Masoudipour, E., H. Amirian, and R. Sahraeian. 2017. A novel Closed-Loop supply chain based on the quality of returned products. *Journal of Cleaner Production* 151 :344–55. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.03.067.
- Mellat-Parast, M. 2013. Supply chain quality management: An inter-organizational learning perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management* 30 (5): 511–29. <https://doi.org/10.1108/09574090910954864>.
- Mendes Dos Reis, J. 2011. *Modelo de avaliação Da qualidade Para redes de suprimentos*. PhD. diss., Universidade Paulista.
- Modak, N., S. Panda, and S. Sana. 2016. Three-Echelon supply chain coordination considering duopolistic retailers

- with perfect quality products. *International Journal of Production Economics* 182:564–78. doi: 10.1016/j.ijpe.2015.05.021.
- Moharana, H., J. S. Murty, S. K. Senapati, and K. Khuntia. 2012. Coordination, Collaboration and integration for supply chain management. *International Journal of Interscience Management Review (IMR)* 2 (2):46–50.
- Montoya-Torres, J., and D. Ortiz-Vargas. 2014. Collaboration and information sharing in dyadic supply chains: A literature review over the period 2000–2012. *Estudios Gerenciales* 30 (133):343–54. doi: 10.1016/j.estger.2014.05.006.
- Montoya-Torres, J., and D. Ortiz-Vargas. 2011. Analysis of the collaboration concept in supply chain: A scientific literature review. In proceedings of ninth latin american and caribbean conference. 1–10. August 3–5, Medellín, Colombia.
- Montoya Quintero, D., and J. Cogollo-Flórez. 2018. Model for evaluating the subjectivity of findings in audits of quality management systems. *Quality - Access to Success* 19 (167):36–42.
- Narasimhan, R., and A. Nair. 2005. The antecedent role of quality, Information sharing and supply chain proximity on strategic alliance formation and performance. *International Journal of Production Economics* 96 (3): 301–13. doi: 10.1016/j.ijpe.2003.06.004.
- Narasimhan, V., K. Venkatasubbaiah, and P. S. Avadhani. 2013. Identification of critical SSCM activities through confirmatory factor analysis. *International Journal for Quality Research* 7 (2):239–48.
- Pang, J., and K. Tan. 2018. Supply chain quality and pricing decisions under Multi-Manufacturer competition. *Industrial Management & Data Systems* 118 (1):164–87. doi: 10.1108/IMDS-03-2017-0092.
- Reisman, A. 2004. How can or/MS educators benefit from creating and using taxonomies?. *INFORMS Transactions on Education* 4 (3):55–65. doi: 10.1287/ited.4.3.55.
- Robinson, C. J., and M. K. Malhotra. 2005. Defining the concept of supply chain quality management and its relevance to academic and industrial practice. *International Journal of Production Economics* 96 (3):315–37. doi: 10.1016/j.ijpe.2004.06.055.
- Romero, J., T. Coudert, L. Geneste, and A. De Valroger. 2012. Collaborative methodology for supply chain quality management: Framework and integration with strategic decision processes in product development. In 6th European Conference on Information Management and Evaluation, ECIME 2012 418–27, Cork, Ireland.
- Sarkar, B., A. Majumder, M. Sarkar, N. Kim, and M. Ullah. 2018. Effects of variable production rate on quality of products in a Single-Vendor Multi-Buyer supply chain management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 99 (1–4):567–81. doi: 10.1007/s00170-018-2527-3.
- Sayama, H. 2015. *Introduction to the modeling and analysis of complex systems*. New York: Open SUNY Textbooks.
- Sharma, A., D. Garg, and A. Agarwal. 2012. Quality management in supply chains: The literature review. *International Journal for Quality Research* 6 (3):193–206.
- Slack, N., A. Brandon-Jones, and R. Johnston. 2016. *Operations management*. 8th ed. Harlow, UK: Pearson.
- Su, Q., and Q. Liu. 2011. Supply Chain Quality Management by Contract Design. In *Supply chain Management - Pathways for research and practice*, edited by D. Onkal and E. Aktas, 57–74. Rijeka: InTech.
- Sun, P., and Q. Li. 2010. Study on supply chain quality management model based on immune theory. In 2010 International Conference on Management and Service Science, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2010.5576336>.
- Tsai, T. P., and F.-C. Wang. 2004. Improving supply chain management: A model for collaborative quality control. In *Advanced Semiconductor Manufacturing, 2004. ASMC '04. IEEE Conference and Workshop*, 36–42. <https://doi.org/10.1109/ASMC.2004.1309531>.
- Wieland, A., R. Handfield, and C. Durach. 2016. Mapping the landscape of future research themes in supply chain management. *Journal of Business Logistics* 37 (3):205–12. doi: 10.1111/jbl.12131.
- Wu, Y., Y. Yang, Z. Wang, and J. Yuan. 2013. Macro quality chain management and coordination optimization research. *Journal of Software* 8 (8):2023–31. <https://doi.org/10.4304/jsw.8.8.2023-2031>.
- Xiao, T., D. Yang, and H. Shen. 2011. Coordinating a supply chain with a quality assurance policy via a revenue-sharing contract. *International Journal of Production Research* 49 (1):99–120. doi: 10.1080/00207543.2010.508936.
- Xu, L. 2011. Information architecture for supply chain quality management. *International Journal of Production Research* 49 (1):183–98. doi: 10.1080/00207543.2010.508944.
- Yan, J., S. Sun, H. Wang, and Z. Hua. 2010. Ontology of collaborative supply chain for quality management. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 4 (4):365–70.
- Yoo, S. 2014. Product quality and return policy in a supply chain under risk aversion of a supplier. *International Journal of Production Economics* 154 :146–55. doi: 10.1016/j.ijpe.2014.04.012.
- Zhang, M., H. Guo, B. Huo, X. Zhao, and J. Huang. 2019. Linking supply chain quality integration with mass customization and product modularity. *International Journal of Production Economics* 207:227–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.01.011>.
- Zimon, D. 2017. The impact of TQM philosophy for the improvement of logistics processes in the supply chain. *International Journal for Quality Research* 11 (1):3–16. <https://doi.org/10.18421/IJQR11.01-01>. doi: 10.24136/oc.v8i4.39.

## **B. Anexo: Paper 2**

Cogollo-Flórez, J. & Correa-Espinal, A. (2017). Modeling Supply Chain Quality Management Performance. En *Proceedings of The 17th International Conference on Modeling and Applied Simulation* (pp. 115-122). Barcelona (España). ISBN 978-88-97999-91-1.

## MODELING SUPPLY CHAIN QUALITY MANAGEMENT PERFORMANCE

Juan Miguel Cogollo Flórez<sup>(a)</sup>, Alexander Alberto Correa Espinal<sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup>Instituto Tecnológico Metropolitano-ITM, Medellín, Colombia

<sup>(b)</sup>Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

<sup>(a)</sup>[juancogollo@itm.edu.co](mailto:juancogollo@itm.edu.co), <sup>(b)</sup>[alcorrea@unal.edu.co](mailto:alcorrea@unal.edu.co)

### ABSTRACT

The body of knowledge of Supply Chain Management has evolved by integrating new approaches and concepts, such as Quality Management. Quality Management research in individual companies is usual, but there is a lack of research on how to incorporate quality requirements in supply chains design and planning. This paper describes the design of a rule-based model for measuring Supply Chain Quality Management performance. The proposed model integrates Triple Bottom Line (3BL) approach with the fuzzy set theory, considering environmental, economic and social performances and the imprecision in quantification of Supply Chain Quality Management performance. The application of the model allowed obtaining a crisp Sustainable Supply Chain Quality Management Index incorporating imprecision and vagueness on these calculations through a fuzzy rule-based system.

Keywords: Modeling, Supply Chain Quality Management, Triple Bottom Line, Fuzzy Logic.

### 1. INTRODUCTION

Quality Management approach has evolved from the traditional scenario focused on the company to complex systems of supply chains. This change in focus has led to a change in competitive priorities of many companies: from product quality to overall supply chain quality (Kuei and Madu 2001). Moreover, research in Supply Chain Management shifted from an operational and tactical level focused on cost, delivery and risk to a more complex and demanding strategic level (Melnyk *et al.* 2009).

A model is a simplified representation of a system and may be conceptual, verbal, diagrammatic, physical or formal (analytical or mathematical). Sayama (2015) highlights the following two approaches for the construction of scientific models:

- Descriptive modeling: it consists of describing the real state of a system at any time using quantitative methods (e.g., regression analysis and pattern recognition).
- Rule-based modeling: it consists of formulating dynamic rules that explain the behavior observed in a system. This type of modeling allows making predictions of possible states of the system, using

dynamic equations, rules and principles, among other quantitative methods.

Both descriptive and rule-based approaches are widely applied in quantitative research in engineering and sciences. However, rule-based modeling plays a prominent role in the research of complex systems (Sayama 2015): the development of a rule-based model at microscopic scales and the study of its macroscopic behavior through computational simulation and/or mathematical analysis is almost a fundamental requirement for the analysis of complex systems, such as Supply Chain Quality Management.

Quality modeling is a little studied issue in Supply Chain Management (Batson and Mcgough 2007). Theory and practices about quality in individual companies are usual, but there is a lack of research on how to incorporate quality requirements in designing and planning global supply chains (Carmignani 2009; Dellana and Kros 2014; Mota *et al.* 2015), and how can be linked these practices and management systems with partners in the supply chain context (Bayo-Moriones *et al.* 2011; Gylling *et al.* 2015; Truong *et al.* 2016).

Although some researches have been carried about alignment between the type of product, strategy and network management systems quality (Mendes Dos Reis 2011) and models for designing and evaluating supply chains with focus on quality (Bayo-Moriones *et al.* 2011; Das and Sengupta 2010; Rashid and Aslam 2012; Truong *et al.* 2016), these ones have a descriptive approach and there is little use of rule-based modeling methods.

Therefore, it is necessary development and implementation of rule-based models for measuring Supply Chain Quality Management performance, considering environmental, economic and social performances and imprecision of data. In order to contribute to generation and dissemination of knowledge in this area, this paper describes a fuzzy rule-based model based on 3BL approach for measuring Supply Chain Quality Management performance.

This paper is structured as follows: first, there are backgrounds about Supply Chain Quality Management and Triple Bottom Line approach. Then, we describe the stages of proposed fuzzy rule-based model for measuring Sustainable Supply Chain Quality Management performance, its theoretical aspects and the application way. Lastly, we show the results obtained by applying

the model and the analysis is made along with the conclusions.

## 2. SUPPLY CHAIN QUALITY MANAGEMENT

The theoretical foundation of Supply Chain Quality Management (SCQM) has been developed and its relevance in academic and industrial practice has been evaluated by comprehensively reviewing prior literature in major journals and inductively identifying the themes that emerge within it (Foster *et al.* 2011; Jraisat and Sawalha 2013; Kannan and Tan 2007).

The SCQM is the integration of Supply Chain Management (SCM) and Quality Management (QM) concepts. SCQM concept has been studied using different perspectives: systems approach, process approach, organizational learning, among others.

Kuei and Madu (2001) used a three-equations approach to outline a SCQM definition:

- SC = production-distribution network.
- Q = to meet market demands and to achieve customer satisfaction in a fast and cost-effective way, and
- M = to improve the conditions and the confidence for supply chain quality.

Robinson and Malhotra (2005) stated that "*SCQM is the formal coordination and integration of business processes involving all partner organizations in the supply chain to measure, analyze and continually improve products, services and processes in order to create value and achieve satisfaction of intermediate and final customers in the marketplace*".

Foster (2008) stated that SCQM is a system-based approach to improve performance, taking advantage of opportunities given by linkages between suppliers and customers. Mellat-Parasat (2013) stated that SCQM is the coordination and integration of inter-company processes involving all supply chain members through continuous improvement of inter-organizational processes in order to improve the performance and achieve customer satisfaction by emphasizing cooperative learning.

## 3. THE TRIPLE BOTTOM LINE

The Triple Bottom Line is a strategic issue and represents the three areas of sustainability: economic, environmental and social (Wilson 2015). Sustainability has become an important issue for most of the organizations and supply chains and it has created the need for developing non-financial measures of performance in addition to traditional measures (Agrawal *et al.* 2016; Hacking and Guthrie 2008). Implementation of social responsibility policies and practices is not only the work of a company but of its supply chain, through the interrelation of partners to become a social responsible supply chain (Cruz-Trejos, Correa-Espinal and Cogollo-Flórez 2012).

Hubbard (2009) developed a Sustainable Balanced Scorecard conceptual framework and proposed an organizational sustainable performance index, calculated as the average performance in each of the six

perspectives. This is a limitation of the model, since it assigns the same relative weight to each perspective.

Longo (2012) developed a simulation model for integrating sustainability aspects (technical, economic and environmental) in supply chain redesign and optimization. The implementation of metaheuristic techniques allowed to obtain positive impacts on the economic and environmental sustainability of the supply chain studied.

Montemanni *et al.* (2013) designed a web-based software application for the sustainable design of a textile and apparel supply chain, in order to compute the environmental impact of the processes and material flows and to obtain alternative designs for the implementation of the supply chain, integrating cost and time performance indicators.

Rizzoli *et al.* (2015) proposed a methodology for including the sustainability assessment in supply chain design and management. The tool is based in collection and organization of sustainability-related data of all stages of the product life cycle and then optimisation to choice in real time the better performing solution in sustainability.

Schulz and Flanigan (2016) developed a framework for a sustainability model in order to establishing a competitive advantage. The model integrates the concepts and roles of competitiveness with the 3BL theory and proposes some performance indicators for calculating Supply Chain Sustainability Index.

Fallahpour *et al.* (2017) developed a model for supplier selection in sustainable supply chain management through a questionnaire-based survey. According to them, the economic aspect was the most essential, followed by environmental aspect and finally social aspect.

## 4. DEVELOPMENT OF A SUSTAINABLE SUPPLY CHAIN QUALITY MANAGEMENT INDEX

The development of the fuzzy rule-based model for measuring Supply Chain Quality Management performance was carried out through six stages: Development of performance indicators and setting fuzzy subsets parameters, Definition of fuzzy inference method, Elaboration of fuzzy rule-based system, Selection of defuzzification method and Calculation of Sustainable Supply Chain Quality Management Index.

### 4.1. Development of performance indicators and setting fuzzy subsets parameters

The first stage is the development of the indicators to measure performance in each one of the 3BL perspectives and thus to measure overall performance in SCQM. Table 1 shows the indicators in every 3BL perspective (Economic, Environmental and Social).



Table 1: Performance indicators and fuzzy subsets parameters of 3BL perspectives performance input variables

3BL	INDICATORS	FUZZY SUBSETS PARAMETERS		
		Low (trapezoidal)	Medium (triangular)	High (trapezoidal)
Economic	Percentage of logistics costs (%)	(0, 0, 6, 10)	(6, 10, 14)	(10, 14, 50, 50)
	Percentage of quality costs (%)	(0, 0, 15, 25)	(15, 25, 35)	(25, 35, 50, 50)
	Return on Assets (%)	(0, 0, 4, 7)	(4, 7, 10)	(7, 10, 50, 50)
Environmental	Average percentage of defective product (%)	(0, 0, 1, 2.5)	(1, 2.5, 4)	(2.5, 4, 20, 20)
	Emissions, effluent and waste as a percentage of total resources used (%)	(0, 0, 10, 20)	(10, 20, 30)	(20, 30, 40, 40)
	Average Percentage of Rejections and Returns (%)	(0, 0, 2, 5)	(2, 5, 8)	(5, 8, 30, 30)
Social	Customer Satisfaction measured as On Time In Full (OTIF) deliveries (%)	(0, 0, 70, 80)	(70, 80, 90)	(80, 90, 100, 100)
	Employee Satisfaction (%)	(0, 0, 40, 60)	(40, 60, 80)	(60, 80, 100, 100)
	Suppliers Development (%)	(0, 0, 30, 50)	(30, 50, 70)	(50, 70, 100, 100)

The parameters of input and output variables fuzzy sets for the calculations of performance by 3BL perspective and the SCQM Index were established by analyzing historical information (frequency histograms and segmentation into quartiles or quintiles according to the number of fuzzy sets established). The model was applied in the supply chain of a plastics sector company, whose name is kept in reserve due to commitments of confidentiality of the information supplied.

**4.2. Definition of fuzzy inference method**

A fuzzy inference method is used to obtain conclusions from “IF-THEN” rules and input values to the system by applying composition relations. Because of the outputs of system are continuous values, the Mandani type inference system was used in this model (Figures 1 and 2).

**4.3. Elaboration of fuzzy rule-based system**

The elaboration of rules is the most important stage in the design of fuzzy-rule based model inasmuch as it combines the expert opinion and the analysis of historical information. In this case, the Senior Management of the company used multiple comparison matrices for the elaboration of fuzzy rules, considering than the main objective of measuring Sustainable Supply Chain Quality Management is not financial or quality

performance but jointly the environmental, economic and social performances.

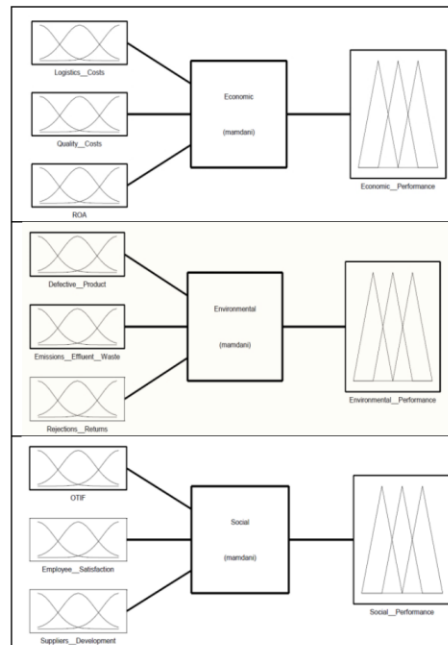


Figure 1: Fuzzy Inference Systems for Economic, Environmental and Social performance measurement.

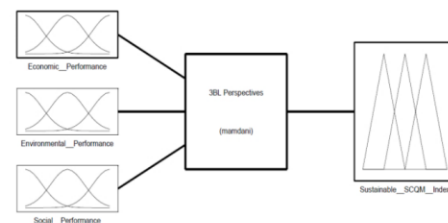


Figure 2: Fuzzy Inference System for measuring Sustainable Supply Chain Quality Management Index.

In this model are used “IF-THEN” rules, composed of the antecedent "IF" and the consequent "THEN", using connectors "AND" to develop necessary decision rules. This model contains three rules sets for 3BL perspectives and one rule set for Sustainable SCQM Index. The construction of fuzzy rule-based system was made by developing a conclusions matrix by considering all possible combinations of inputs and assigning a conclusion to each (Tables 2, 3, 4 and 5).

Table 2: Fuzzy rules matrix of Economic perspective

ROA	Low	<b>Logistics Costs</b>	<b>Quality Costs</b>			
		Low	M	L	L	
		Medium	L	L	L	
	Medium	<b>Logistics Costs</b>	<b>Quality Costs</b>			
		Low	M	M	M	
		Medium	M	M	L	
	High	<b>Logistics Costs</b>	<b>Quality Costs</b>			
		Low	H	M	M	
		Medium	M	M	M	
			High	M	L	L

Table 3: Fuzzy rules matrix of Environmental perspective

Defective product	Low	<b>Emissions, Effluent &amp; waste</b>	<b>Rejections &amp; Returns</b>			
		Low	H	H	M	
		Medium	H	M	M	
	Medium	<b>Emissions, Effluent &amp; waste</b>	<b>Rejections &amp; Returns</b>			
		Low	H	M	M	
		Medium	M	M	M	
	High	<b>Emissions, Effluent &amp; waste</b>	<b>Rejections &amp; Returns</b>			
		Low	M	M	L	
		Medium	M	L	L	
			High	L	L	L

Table 4: Fuzzy rules matrix of Social perspective

OTIF	Low	<b>Employee satisfaction</b>	<b>Suppliers development</b>			
		Low	L	L	L	
		Medium	L	M	M	
	Medium	<b>Employee satisfaction</b>	<b>Suppliers development</b>			
		Low	L	M	M	
		Medium	M	M	M	
	High	<b>Employee satisfaction</b>	<b>Suppliers development</b>			
		Low	M	M	M	
		Medium	M	M	H	
			High	M	H	H

Table 5: Fuzzy rules matrix of Sustainable SCQM Index

Economic Performance	Low	<b>Environmental Performance</b>	<b>Social Performance</b>			
		Low	L	L	L	
		Medium	L	L	M	
	Medium	<b>Environmental Performance</b>	<b>Social Performance</b>			
		Low	L	M	M	
		Medium	M	M	M	
	High	<b>Environmental Performance</b>	<b>Social Performance</b>			
		Low	M	M	M	
		Medium	M	M	M	
			High	M	H	H

Economic, Environmental and Social perspectives and Sustainable SCQM Index were evaluated on three input variables, which have three fuzzy categories (Table 1). Therefore, there are  $3^3 = 27$  fuzzy rules in each of their systems.

Values in cells of Tables 2-5 represent the consequent describing each combination and correspond to linguistic labels of output variable fuzzy subsets, and "L" corresponds to low, "M" is medium and "H" is high. For example, in the Table 5, shaded cell corresponds to the following rule: IF "Economic performance" is High AND "Environmental performance" is Medium AND "Social Performance" is High THEN Sustainable SCQM Index is Medium.

The application of the Mandani type fuzzy inference system based on the rules systems previously described also allowed to obtain response surface 3D graphs for modeling the relation between the input and output variables in each 3BL perspective and in the Sustainable SCQM Index (Figures 3,4,5 and 6).

For example, Figure 6 shows that both Environmental and Economic performance contribute to the Sustainable SCQM Index, but the impact of Economic performance is greater at lower values than Environmental performance.

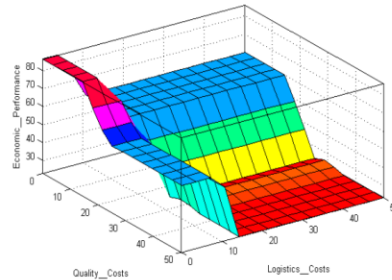


Figure 3: The 3D relation of input indicators (quality costs and logistics costs) and output variable (Economic Performance)

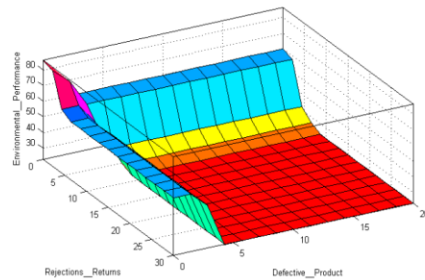


Figure 4: The 3D relation of input indicators (rejections and returns and defective product) and output variable (Environmental Performance)

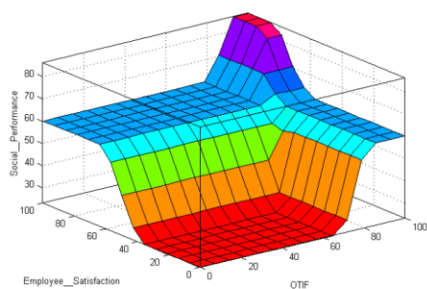


Figure 5: The 3D relation of input indicators (employee satisfaction and OTIF) and output variable (Social Performance)

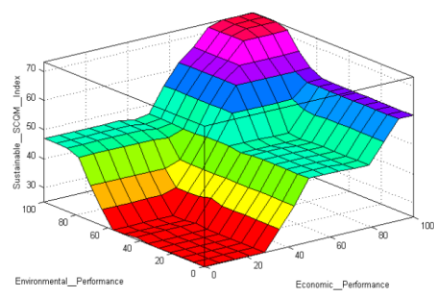


Figure 6: The 3D relation of input performance (Environmental and Economic) and output variable (Sustainable SCQM Index)

**4.4. Selection of Defuzzification Method**

Since the result of inference process is a set with a fuzzy distribution in response and for decision making it is necessary to use specific responses, the fuzziness must be removed and to obtain a crisp number. The center of area method was used in this model for defuzzification, because of its continuity and that calculates the overlap area only once. The crisp value of the performance indicators for each 3BL perspective and the Sustainable SCQM Index were generated by the search of gravity center of the membership function of respective fuzzy outputs (Figures 7, 8, 9 and 10). The Fuzzy Logic Designer Application of Matlab© software was used as support for development of every stage of fuzzy rule-based model.

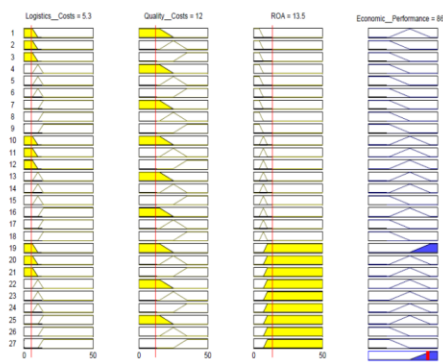


Figure 7: Scheme results of the fuzzy inference procedure to calculate Economic Performance

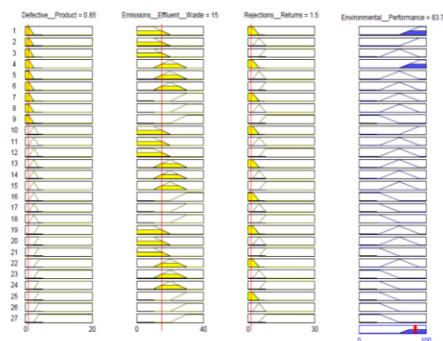


Figure 8: Scheme results of the fuzzy inference procedure to calculate Environmental Performance

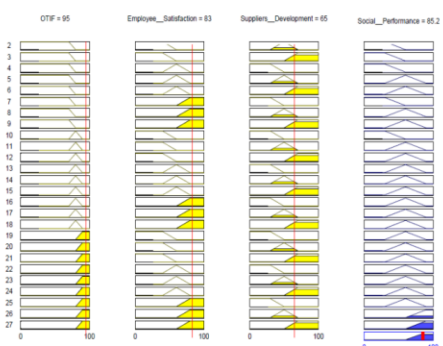


Figure 9: Scheme results of the fuzzy inference procedure to calculate Social Performance

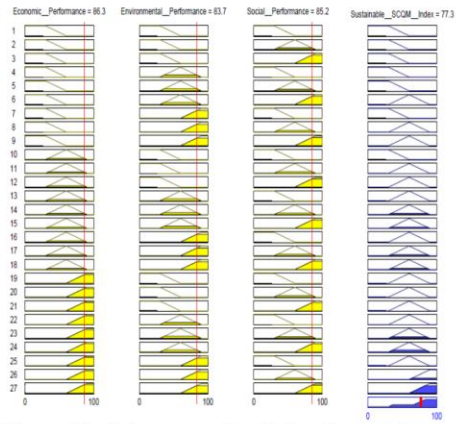


Figure 10: Scheme results of the fuzzy inference procedure to calculate Sustainable SCQM Index

#### 4.5. Calculation of Sustainable Supply Chain Quality Management Index

The crisp numbers results of applying the fuzzy rule-based model for measuring Sustainable SCQM Index are shown in top of Figures 7 to 10. The results may be expressed in terms of the fuzzy rule-based systems, as follows:

- Economic Performance: IF Percentage of logistics costs is 5.3% AND Percentage of quality costs is 12% AND Return of Assets is 13.5% THEN Economic Performance is 86.3% (Figure 7).
- Environmental Performance: IF Percentage of defective product is 0.85% AND percentage of emissions, effluent and waste is 15% AND Percentage of rejections and returns is 1.5% THEN Environmental Performance is 83.7% (Figure 8).
- Social Performance: IF OTIF is 95% AND Employee satisfaction is 83% AND percentage of suppliers development is 65% THEN Social Performance is 85.2% (Figure 9).
- Sustainable SCQM Index: IF Economic Performance is 86.3% AND Environmental Performance is 83.7% AND Social Performance is 85.2% THEN Sustainable SCQM Index is 77.3% (Figure 10).

These numerical results may be interpreted as the compliance percentage of the goals and objectives of sustainability of the quality management practices in the supply chain context.

Moreover, it is important to highlight this model allows to make sensitivity analysis by varying the input variables values and then seeing the impact of the changes on the final performance. For example, if the company achieves to improve the performance of each 3BL perspective by 10% (thus, Economic Performance is 94.9%, Environmental Performance is 92.1% and Social Performance is 93.7%), the Sustainable SCQM Index would be 86.3% (Figure 11), which means that it

would be improved by 11.6%, compared to the initial result of 77.3%.

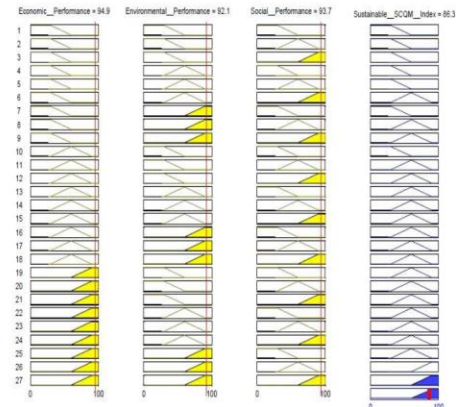


Figure 11: Results of the Sustainable SCQM Index obtained if the performance of each 3BL perspective would improve by 10%

#### 5. CONCLUSIONS

The application of the fuzzy rule-based model allowed obtaining a crisp number as Sustainable SCQM Index that is important for decisions making. The model is based on a set of fuzzy rules easily interpretable and apprehended by the people involved in quality management in the supply chain.

The fuzzy rule-based model has a systematic structure that allows easy adaptation to others supply chains or other business management problems. The joint implementation of fuzzy logic and 3BL provides a new approach for modeling imprecision and interrelation of Economic, Environmental and Social variables in SCQM context.

#### REFERENCES

- Agrawal S., Singh R.K. and Murtaza Q., 2016. Triple Bottom Line Performance Evaluation of Reverse Logistics. *Competitiveness Review*, 26 (3), 289–310.
- Batson R.G. and Mcgough K.D., 2007. New direction in quality engineering: supply chain quality modelling. *International Journal of Production Research*, 45 (23), 455–5464.
- Bayo-Moriones A., Bello-Pintado A. and Merino-Díaz-de-Cerio J., 2011. Quality assurance practices in the global supply chain: the effect of supplier localisation. *International Journal of Production Research*, 49 (1), 255–268.
- Carmignani G., 2009. Supply chain and quality management: The definition of a standard to implement a process management system in a supply chain. *Business Process Management Journal*, 15 (3), 395–407.



- Cruz-Trejos E., Correa-Espinal A.A. and Cogollo-Florez, J.M., 2012. Supply Chain Social Responsibility. *Gestión y Región*, 13, 89–106.
- Das K. and Sengupta S., 2010. Modelling supply chain network: a quality-oriented approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 27 (5), 506–526.
- Dellana S. and Kros J., 2014. An exploration of quality management practices, perceptions and program maturity in the supply chain. *International Journal of Operations & Production Management*, 34 (6), 786–806.
- Fallahpour A., Olugu E., Musa S., Wong K. and Noori S., 2017. A decision support model for sustainable supplier selection in sustainable supply chain management. *Computers & Industrial Engineering*, 105, 391–410.
- Foster S.T., 2008. Towards an understanding of supply chain quality management. *Journal of Operations Management*, 26 (4), 461–467.
- Foster S.T., Wallin C. and Ogden J., 2011. Towards a better understanding of supply chain quality management practices. *International Journal of Production Research*, 49 (8), 2285–2300.
- Gylling M., Heikkilä J., Jussila K. and Saarinen M., 2015. Making decisions on offshore outsourcing and backshoring: A case study in the bicycle industry. *International Journal of Production Economics*, 162, 92–100.
- Hacking T. and Guthrie P., 2008. A framework for clarifying the meaning of Triple Bottom-Line, Integrated, and Sustainability Assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, 28 (2), 73–89.
- Hubbard G., 2009. Measuring organizational performance: Beyond the triple bottom line. *Business Strategy and the Environment*, 19, 177–191.
- Jraisat L.E. and Sawalha I.H., 2013. Quality control and supply chain management: a contextual perspective and a case study. *Supply Chain Management: An International Journal*, 18 (2), 194–207.
- Kannan V.R. and Tan K.C., 2007. The impact of operational quality: a supply chain view. *Supply Chain Management: An International Journal*, 12 (1), 14–19.
- Kuei C.-H. and Madu C.N., 2001. Identifying critical success factors for supply chain quality management (SCQM). *Asia Pacific Management Review*, 6 (4), 409–423.
- Longo F., 2012. Sustainable supply chain design: an application example in local business retail. *Simulation*, 88 (12), 1484–1498.
- Mellat-Parast M., 2013. Supply chain quality management: An inter-organizational learning perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 30 (5), 511–529.
- Melnyk S., Lummus R., Vokurka R., Burns L. and Sandor J., 2009. Mapping the future of supply chain management: a Delphi study. *International Journal of Production Research*, 47 (16), 4629–4653.
- Mendes Dos Reis J.G., 2011. Modelo de Avaliação da Qualidade para Redes de Suprimentos. Universidade Paulista: Tese de Doutorado em Engenharia de Produção.
- Montemanni R., Valeri C., Nesci S., Gambardella L.M., Gioacchini M., Fumagalli T., Zeller H., Meyer K., Faist M. and Rizzoli A.E., 2013. Supply chain design and sustainability in the textile sector. *Proceedings of 5th International Conference on Applied Operational Research*, pp. 67-73. July 29-31, Lisbon (Portugal).
- Mota B., Gomes M., Carvalho A. and Barbosa-Povoa A.P., 2015. Towards supply chain sustainability: Economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, 105, 14–27.
- Rashid K. and Aslam M.M.H., 2012. Business excellence through total supply chain quality management. *Asian Journal on Quality*, 13 (3), 309–324.
- Rizzoli A.E., Montemanni R., Bettoni A. and Canetta L., 2015. Software Support for Sustainable Supply Chain Configuration and Management. In: L. Hilty and B. Aebischer, eds. *Advances in Intelligent Systems and Computing* 310, ICT Innovations for Sustainability. Zurich: Springer, 271–283.
- Robinson C.J. and Malhotra M.K., 2005. Defining the concept of supply chain quality management and its relevance to academic and industrial practice. *International Journal of Production Economics*, 96 (3), 315–337.
- Sayama H., 2015. *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*. New York: Open SUNY Textbooks.
- Schulz S.A. and Flanigan R.L., 2016. Developing competitive advantage using the triple bottom line: a conceptual framework. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 31 (4), 449–458.
- Truong H., Sampaio P., Carvalho M., Fernandes A., Binh D. and Vilhenac E., 2016. An extensive structural model of supply chain quality management and firm performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 33 (4), 444–464.
- Wilson J.P., 2015. The triple bottom line: Undertaking an economic, social, and environmental retail sustainability strategy. *International Journal of Retail & Distribution Management*, 43 (4/5), 432–447.

## C. Anexo: Paper 3

Cogollo-Flórez, J. & Correa-Espinal, A. (2018). Rule-based Modeling of Supply Chain Quality Management. En *Proceedings of The 18th International Conference on Modeling and Applied Simulation* (pp. 120-125). Budapest (Hungría). ISBN 978-88-85741-07-2.

## RULE-BASED MODELING OF SUPPLY CHAIN QUALITY MANAGEMENT

Juan Miguel Cogollo Flórez<sup>(a)</sup>, Alexander Alberto Correa Espinal<sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup>Instituto Tecnológico Metropolitano-ITM, Medellín, Colombia

<sup>(b)</sup>Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

<sup>(a)</sup>[juancogollo@itm.edu.co](mailto:juancogollo@itm.edu.co), <sup>(b)</sup>[alcorrea@unal.edu.co](mailto:alcorrea@unal.edu.co)

### ABSTRACT

Analytical modeling of Supply Chain Quality Management (SCQM) is one of the main research avenues in both Quality Management (QM) and Supply Chain Management (SCM). Therefore, the purpose of this paper is to analyze rule-based modeling for SCQM coordination and integration and to develop a model for SCQM integration using Fuzzy Cognitive Maps. The model contains nine SCQM concepts and their relations. The convergence analysis of the inference process validated the initial selection of the SCQM concepts and the values of their relations. The results of the model allowed identifying the concepts rejections, returns, and defective product in production, as the most important decision making variables for improvement quality management in the supply chain studied.

Keywords: Modeling, Supply Chain Quality Management, rule-based models, Fuzzy Cognitive Map.

### 1. INTRODUCTION

Supply Chain Quality Management (SCQM) refers to the coordination and/or integration strategies along the supply chain, in order to improve quality and overall performance (Kuei and Madu 2001; Robinson and Malhotra 2005; Foster 2008; Mellat-Parast 2013; Flynn and Zhao 2015).

Evans, Foster and Linderman (2014) carried out a study on the content and research trends in quality management and established that current avenues of research are focused on development of mathematical models, global contingency analysis, supply chain quality, information technologies and strategic benefits. In addition, the authors stated that few works have been developed on quality performance in the supply chain and how cooperation can lead a better performance.

Although products quality and safety would be considered as overcome issues by applying the current standardization systems, in recent years there have been frequent events of recalls due to safety and/or quality failures in automotive, toy, computer and electronic equipment manufacturers (Flynn and Zhao 2015). So, the need for researching mechanisms and strategies of SCQM is a current issue.

Therefore, it is necessary development and implementation of rule-based models for SCQM

coordination and integration. In order to contribute to generation and dissemination of knowledge in this area, this paper describes a rule-based model for SCQM integration using FCM.

This paper is structured as follows: The next section provides a general definition of SCQM coordination and integration. Then, the results of a literature review on SCQM rule-based modeling are shown. After, there is a brief description on modeling with Fuzzy Cognitive Maps. Lastly, the results of developing the model for SCQM integration using FCM are presented and analyzed as part of the conclusions.

### 2. SUPPLY CHAIN QUALITY MANAGEMENT COORDINATION AND INTEGRATION

In SCM, Coordination is carried out by sending the correct signals or sharing the correct information and the same policies (Montoya-Torres and Ortiz-Vargas 2014). Likewise, Integration refers to "making a whole, gathering its constituent parts", that is, synchronizing requirements, concepts and flows of the chain members aimed to maximize competitive advantages at strategic, tactical and operative levels (Bautista-Santos et al. 2015). Based on above, SCQM coordination may be considered as the Quality Management practices aimed to improve supply chain overall performance and the SCQM integration as development of a single point of view (a common language) in all supply chain members to synchronously manage issues related to Quality Management.

### 3. SCQM RULE-BASED MODELING: A REVIEW

Formal modeling (analytical or mathematical) of a system may be basically using two approaches: Descriptive modeling and Rule-based modeling. Descriptive modeling is static and consists of describing the real state of a system at any time using quantitative methods; it is usually used in the initial stages of research of a complex system. Rule-based modeling consists of formulating dynamic rules that explain the behavior observed in a system and allows to predict future states of the system (Sayama 2015).

A comprehensive Literature Review was carried out, in order to identify the most important contributions that have been made concerning to SCQM rule-based

modeling, over the last 18 years. The used methodology allowed us to seek, identify, interpret and synthesize the documented evidence in the time period (2000 to 2018) and to identify research topics.

In order to identify how SCQM may be coordinated and integrated through rule-based models, the following research question was formulated: What rule-based models for SCQM coordination and/or integration have been proposed in the period between 2000 and 2018? Then, the search was carried out considering a compendium of the following databases: Science Direct, IEEE, Springer, Taylor & Francis and Emerald. By applying the search criteria and considering the selected databases, 357 publications were obtained.

The selection of the documented evidence concerning to the research question was carried out considering two inclusion criteria: (i) It presents a rule-based model for SCQM analysis, and (ii) It presents a rule-based model for SCQM coordination and/or integration. Moreover, the papers that met any of the following characteristics (exclusion criteria) were excluded: (i) It presents theoretical development on SCQM, and (ii) It presents a descriptive model for SCQM coordination and/or integration.

The 357 publications obtained in the search process were analyzed by application of the above inclusion and exclusion criteria and, then, 15 papers were selected. Based on analysis of the selected papers, a profile of the SCQM Rule-Based Modeling was made (Figure 1), according to applied tool, SCQM objective (coordination and/or integration) and authors.

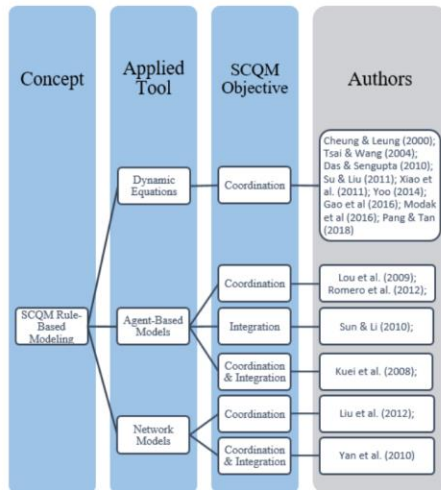


Figure 1: Profile of the SCQM Rule-Based Modeling according to the selected papers.

The 15 articles selected and confirmed as relevant as per the literature review are visually represented in Venn Diagram form in Figure 2 in line with the SCQM

objective of the models proposed in them. Most of the rule-based models were for SCQM coordination (80%). The 13% of the models were for SCQM coordination and integration. On the other hand, only 7% of the models were for SCQM integration. Based on the above, the need for developing rule-based models for SCQM coordination and integration is evident.

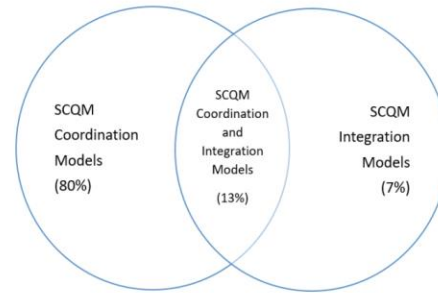


Figure 2: Representation of percentage of articles identified proposing ruled-based models for SCQM coordination and/or integration.

The following paragraphs detail the main contributions identified in the literature in SCQM rule-based modeling, based on the profile of the Figure 1.

**3.1. Dynamical Equations Models**

The Dynamical Equations models consider how the states of components change over time through their interactions with other nodes that are connected to them. Cheung and Leung (2000) developed a coordinated replenishment model considering inventory control and quality control problems, with a two-item inventory and quality costs depending on the costs acceptance sampling plans. Tsai and Wang (2004) proposed a model of collaborative quality control in the semiconductor industry, considering practices and protocols to ensure quality of outsourced and offshored processes.

Das and Sengupta (2010) developed a mathematical model for supply chain design considering suppliers recruitment with appropriate contractual agreements and quality assurance systems. Su and Liu (2011) developed a SCQM coordination model by contracts and information exchange, considering external failure sharing in a supplier-manufacturer supply chain.

Xiao et al (2011) proposed mechanisms for coordinating quality assurance policies in Make To Order (MTO) environments, considering one manufacturer and one retailer via a revenue-sharing contract. Yoo (2014) developed a model for coordinating return policy and product quality decisions in supply chains under risk aversion of a supplier.

Gao et al (2016) proposed a coordination model for quality improvement in a two-stage decentralised supply chain with a partial cost allocation contract. Modak et al (2016) proposed a hybrid contract mechanism for the coordination of a manufacturer–distributor–duopolistic



retailers supply chain for a product, where the manufacturer supplies lotsize with a random portion of imperfect quality. Pang and Tan (2018) proposed a model for making quality decisions of a single product in a supply chain with a supplier and two competing manufacturers. The model examines the optimum quality strategies under different cooperative mechanisms and investigate its effects on channel members' profits.

### 3.2. Agent-Based Models

Agent-based models are computational simulation models that involve many discrete agents, where each agent behavioral rules are described in an algorithmic fashion rather than a purely mathematical way. This allows implementing complex internal properties of agents and their nontrivial behavioral rules (Sayama 2015).

Lou et al (2009) proposed a cooperative quality management architecture in supply chains, with production and outsourcing, based on a multi-agent system with information exchange. Romero et al (2012) developed a collaborative model for solving problem adapted to SCQM, considering strategic decisions in product development.

Sun and Li (2010) developed a SCQM model based on immune theory by analyzing the mechanisms and functions from four aspects: recognition, learning, memory, effects. Kuei et al (2008) developed a simulation study of SCQM considering the effectiveness of supply chain operations, demand uncertainty, supply chain speed, and quality and distribution issues.

### 3.3. Network Models

Network models are based on a set of network layers and how they interact. They are one of the most recent developments of complex systems science. Their historical roots are discrete mathematics and statistical physics (Sayama 2015).

In this area, Liu et al (2012) developed a Petri net model for SCQM conflict resolution of a complex product. It allows making decisions to select the appropriate activities when a quality conflict has happened. Yan et al (2010) proposed an ontology of collaborative supply chain. It provides a foundation for the coordination and integration of the business process to measure, analyze, and continually improve the quality of products, services, and process.

## 4. MODELING WITH FUZZY COGNITIVE MAPS

Fuzzy Cognitive Map (FCM) is a tool for modeling complex systems utilizing existence knowledge and human experience and/or available knowledge from existing databases in the form of rules. FCMs are a combination of fuzzy set theory with heuristic learning of neural networks (León et al. 2010).

Figure 3 illustrates a FCM representation and its elements. A FCM consists of concepts ( $C$ ) which represent the studied system, and directed arcs which represent the casual relationships between the concepts

(Kosko 1986). The concepts are indexed by subscripts  $i$  (cause node) and  $j$  (effect node). Each directed arc is labeled with a fuzzy value ( $e$ ) in the interval  $[-1, +1]$  that represents the strength of impact between the concepts. The weights assigned ( $e_{ij}$ ) to the pairs of concepts ( $C_{ij}$ ) are stored in an adjacency matrix  $E$  (Papageorgiou 2014).

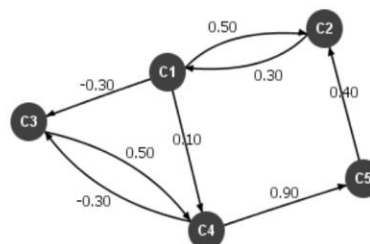


Figure 3: Example of a FCM representation with five concepts.

The mathematical modeling is carried out after the FCM is constructed and data from the input concepts are feed. Values of the concept  $C_i$  in time  $t$  are represented by the state vector  $A_i(k)$ . The state of the FCM is described by the state vector  $A(k) = [A_1(k), \dots, A_n(k)]$ . The value  $A_i$  in a moment  $k+1$  is calculated by the sum of the previous value of  $A_i$  in a prior moment  $k$  with the product of the value  $A_j$  of the cause node  $C_j$  in precedent moment  $k$  and the value of the cause-effect link  $e_{ij}$ :

$$A_i(k+1) = f(A_i(k) + \sum_{j=1}^N A_j(k) \cdot e_{ji}) \quad (1)$$

where  $f(\cdot)$  is an activation function which gives values of concepts in the range  $[0, 1]$  and is formulated as follows:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-mx}} \quad (2)$$

where  $m$  is a real positive number and  $x$  is the value  $A_i^{(k)}$  on the equilibrium point.

FCMs have been applied in recent years in the analysis of complex systems, through simulation, modeling and decision analysis (Rezaee et al. 2017), since they allow predicting and analyzing influences and performances of complex event using analysis of causal relationships that change over time (Dickerson and Kosko 1994; Jetter and Kok 2014).

FCMs have been used, for example, to model the causal relationships of a stakeholder relations management system (Susniene et al. 2014), to estimate crop yield (Mourhir et al. 2017), to model the total energy behavior of buildings (Mpelogianni et al. 2015), among other applications.

**5. DEVELOPMENT OF A SCQM INTEGRATION MODEL USING FUZZY COGNITIVE MAP**

The development of the SCQM model using FCM was carried out through three steps (Kandasamy and Smarandache 2003): Selection of concepts and relations (adjacency matrix), Performance of the inference process and Convergence analysis.

**5.1. Selection of concepts and relations**

The first stage is the development of the SCQM concepts and their relations. The relations values were established through analysis of historical data in the supply chain of a plastics sector company, whose name is kept in reserve due to commitments of confidentiality of the information supplied. Table 1 shows the adjacency matrix of SCQM concepts. Figure 4 shows the FCM corresponding to the relationships established in Table 1.

Table 1: Adjacency matrix for SCQM modeling using FCM

SCQM Concepts	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
	Logistics costs (%)	Quality costs (%)	Return on Assets (ROA)	Defective product in production (%)	Emissions, effluent and waste (%)	Rejections and Returns (%)	Customer Satisfaction (OTIF deliveries)	Employee Satisfaction (%)	Suppliers Development (%)
C1 Logistics costs (%)	0	0.2	-0.7	0	0.3	0.2	-0.5	0	-0.4
C2 Quality costs (%)	0.5	0	-0.8	1	0.75	1	0.9	0.3	0
C3 Return on Assets (ROA)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C4 Defective product in production (%)	-1	-1	-1	0	-0.8	-1	-0.8	-0.25	0
C5 Emissions, effluent and waste (%)	-1	-0.9	-0.8	-0.6	0	0	-0.6	-0.4	0
C6 Rejections and Returns (%)	-1	-1	-1	0	-1	0	-1	-0.25	0
C7 Customer Satisfaction (OTIF)	-1	-0.5	0.7	0	0	0	1	0	0.8
C8 Employee Satisfaction (%)	1	1	1	1	0.6	1	1	0	0
C9 Suppliers Development (%)	1	1	1	1	1	1	1	0.6	0

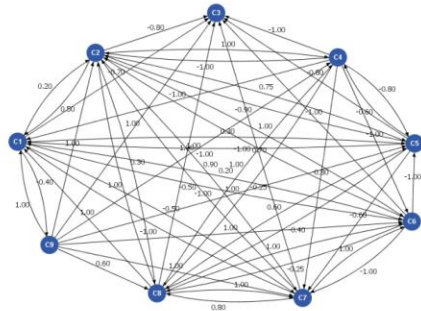


Figure 4: The FCM developed for SCQM modeling.

**5.2. Performance of the inference process**

The parameters related to the inference process are the inference rule, the transfer function and the stopping criterion. In this model, the inference process was carried out by performing WHAT-IF simulations and the Kosko's activation rule with self-memory (equation 1)

was used. The stopping criterion was established when a fixed-point attractor is reached.

The WHAT-IF simulation is performed by multiplying the input configuration vector representing the state of each node with the adjacency matrix. Thus, the input for iteration  $k+1$  is the sum of output from iteration  $k$  and input of iteration  $k$ .

The Kosko's activation rule with self-memory was used because, unlike the standard Kosko's activation rule, it takes into consideration the previous state of the current node in addition to the other, linked nodes and the weight of those connections (Obiedat and Samarasinghe 2016). Figure 5 shows the results of the inference process, demonstrating the convergence of model concepts.

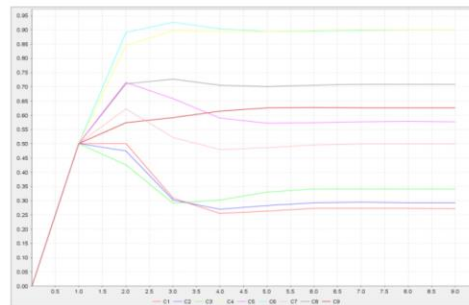


Figure 5: Results of the inference process.

**5.3. Convergence analysis**

After performing the inference process, a FCM has three behavior options: (i) The successive state vectors converge quickly to a stable state (a fixed-point attractor), (ii) A series of state vectors appear over and over periodically (a limit cycle), or (iii) The state vector changes "randomly" after every cycle (a chaotic behavior) (Tsadiras 2008).

Because the studied model characteristics, we established the stopping criterion when a fixed-point attractor is reached. In SCQM modeling is desired that outcomes converge to a fixed value because this way the future stable state of the system can be predicted and right decisions may be made.

Figure 5 shows that concept values converged fast to their final, stable values. Table 2 shows the values of concepts in the last simulation step and their order. These results allow us to identify three decision-making ranges and to prioritize the SCQM concepts most important.

The first one consists of the highest concept values: rejections, returns, and defective product in production. The second one consists of employee satisfaction, suppliers development, emissions, effluent and waste and customer Satisfaction. The third one consists of ROA, quality costs and logistics costs. This is because the latter are output vectors whose results depend on the decisions made in the concepts of the first two ranges.

Table 2: The order and final values of vectors for SCQM modeling

	SCQM CONCEPT	ORDER	VALUE
C6	Rejections and Returns (%)	1	0.8987
C4	Defective product in production (%)	2	0.8984
C8	Employee Satisfaction (%)	3	0.7094
C9	Suppliers Development (%)	4	0.6265
C5	Emissions, effluent and waste (%)	5	0.5779
C7	Customer Satisfaction (OTIF deliveries)	6	0.4996
C3	Return on Assets (ROA)	7	0.3411
C2	Quality costs (%)	8	0.2923
C1	Logistics costs (%)	9	0.2721

## 6. CONCLUSIONS

In this paper, we analyzed rule-based modeling for SCQM coordination and integration by a comprehensive literature review on studies published from 2000 to 2018, in order to identify the main contributions, the analytical modelling techniques used and the main research avenues. Most of rule-based models for SCQM were for coordination and there is a lack of models for integration and joint coordination and integration.

We developed a SCQM model using FCM. The results obtained by simulation and the convergence analysis of the inference process validated the initial selection of the SCQM concepts and the values of their relations.

This paper is the result of the initial step of an ongoing research aimed to develop an analytical model for Supply Chain Quality Management coordination and integration using multi-stage modelling approach, considering multiple products and supply chain levels. The next steps will be focused on determination of a greater number of levels and agents, their coordination and integration strategies and refinement of inference process.

## REFERENCES

- Bautista-Santos H. et al., 2015. Integration model of collaborative supply chain. *Dyna*, 82(193), 145–154.
- Cheung K.L. and Leung, K.F., 2000. Coordinating replenishments in a supply chain with quality control considerations. *Production Planning and Control*, 11(7), 697–705.
- Das K. and Sengupta S., 2010. Modelling supply chain network: a quality-oriented approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 27(5), 506–526.
- Dickerson J.A. and Kosko B., 1994. *Virtual Worlds as Fuzzy Cognitive Maps*. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 3(2), 173–189.
- Evans J.R., Foster S.T. and Linderman K., 2014. A Content Analysis of Research in Quality Management and a Proposed Agenda for Future Research. *Quality Management Journal*, 21(2), 17–44.
- Flynn B. and Zhao X., 2015. *Global Supply Chain Quality Management: Product Recalls and Their Impact*. Boca Raton: CRC Press.
- Foster S.T., 2008. Towards an understanding of supply chain quality management. *Journal of Operations Management*, 26(4), 461–467.
- Gao C. et al., 2016. Incentives for quality improvement efforts coordination in supply chains with partial cost allocation contract. *International Journal of Production Research*, 54(20), 6213–6231.
- Jetter A.J. and Kok K., 2014. Fuzzy Cognitive Maps for futures studies-A methodological assessment of concepts and methods. *Futures*, 61, 45–57.
- Kandasamy V. and Smarandache F., 2003. *Fuzzy Cognitive Maps and Neutrosophic Cognitive Maps*. Phoenix: Xiquan.
- Kosko B., 1986. Fuzzy cognitive maps. *Int. J. Man-Machine Studies*, 24, 65–75.
- Kuei C.-H. and Madu C.N., 2001. Identifying critical success factors for supply chain quality management (SCQM). *Asia Pacific Management Review*, 6(4), 409–423.
- Kuei C.-H., Madu C.N. and Winch J.K., 2008. Supply chain quality management: a simulation study. *Information and Management Sciences*, 19(1), 131–151.
- León M. et al., 2010. Fuzzy Cognitive Maps for Modeling Complex Systems. *Proceedings of 9th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2010*, pp. 166–174.
- Liu Y. et al., 2012. Petri net model for supply-chain quality conflict resolution of a complex product. *Kybernetes*, 41(7/8), 920–928.
- Lou P. et al., 2009. Production-Outsourcing Supply Chain Quality Management Based on Multi-Agent System. *Proceedings of The 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IE&EM '09*, pp. 1555–1559.
- Mellat-Parast M., 2013. Supply chain quality management: An inter-organizational learning perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 30(5), 511–529.
- Modak N.M., Panda S. and Sana S.S., 2016. Three-echelon supply chain coordination considering duopolistic retailers with perfect quality products. *International Journal of Production Economics*, 182, 564–578.
- Montoya-Torres J.R. and Ortiz-Vargas D.A., 2014. Collaboration and information sharing in dyadic supply chains: A literature review over the period 2000–2012. *Estudios Gerenciales*, 30, 343–354.
- Mourhir A. et al., 2017. Exploring Precision Farming

- Scenarios Using Fuzzy Cognitive Maps. *Sustainability*, 9(7), 1241-1263.
- Mpelogianni V., Marnetta P. and Groumpos P.P., 2015. Fuzzy Cognitive Maps in the Service of Energy Efficiency. *IFAC-PapersOnLine*, 48(24), 1-6.
- Obiedat M. and Samarasinghe S., 2016. A novel semi-quantitative Fuzzy Cognitive Map model for complex systems for addressing challenging participatory real life problems. *Applied Soft Computing Journal*, 48, 91-110.
- Pang J. and Tan K.H., 2018. Supply chain quality and pricing decisions under multi-manufacturer competition. *Industrial Management & Data Systems*, 118(1), 164-187.
- Papageorgiou E., 2014. *Fuzzy Cognitive Maps for Applied Sciences and Engineering: From Fundamentals to Extensions and Learning Algorithms*. Berlin: Springer.
- Rezaee M.J., Yousefi S. and Babaei M., 2017. Multi-stage cognitive map for failures assessment of production processes: An extension in structure and algorithm. *Neurocomputing*, 232, 69-82.
- Robinson C.J. and Malhotra M.K., 2005. Defining the concept of supply chain quality management and its relevance to academic and industrial practice. *International Journal of Production Economics*, 96(3), 315-337.
- Romero J.C. et al., 2012. Collaborative methodology for supply chain quality management: Framework and integration with strategic decision processes in product development. *Proceedings of the 6th European Conference on Information Management and Evaluation, ECIME 2012*, pp. 418-427.
- Sayama H., 2015. *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*. New York: Open SUNY Textbooks.
- Su Q. and Liu Q., 2011. Supply Chain Quality Management by Contract Design. In D. Önkal & E. Aktas, eds. *Supply Chain Management - Pathways for Research and Practice*. Rijeka: InTech, 57-74.
- Sun P. and Li Q., 2010. Study on Supply Chain Quality Management Model Based on Immune Theory. *Proceedings of the 2010 International Conference on Management and Service Science*, pp.1-4.
- Susniene D. et al., 2014. Using Fuzzy Cognitive Map Approach to model the casual relationships in stakeholder management at companies. *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications*, pp. 121-124. Vietri sul Mare, Italy.
- Tsadiras A.K., 2008. Comparing the inference capabilities of binary, trivalent and sigmoid fuzzy cognitive maps. *Information Sciences*, 178(20), 3880-3894.
- Tsai T.P. and Wang F.-C., 2004. Improving Supply Chain Management: A Model for Collaborative Quality Control. In *Advanced Semiconductor Manufacturing, 2004, ASMC'04. IEEE Conference and Workshop*, pp. 36-42.
- Xiao T., Yang D. and Shen H., 2011. Coordinating a supply chain with a quality assurance policy via a revenue-sharing contract. *International Journal of Production Research*, 49(1), 99-120.
- Yan J. et al., 2010. Ontology of Collaborative Supply Chain for Quality Management. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 4(4), 365-370.
- Yoo S.H., 2014. Product quality and return policy in a supply chain under risk aversion of a supplier. *International Journal of Production Economics*, 154, 146-155.

#### AUTHORS BIOGRAPHY

**Juan M. Cogollo Flórez** is a Professor at the Department of Quality and Production, Instituto Tecnológico Metropolitano-ITM, Medellín, Colombia. He received a MSc in Management Engineering in 2011, from the Universidad Nacional de Colombia. He is currently a doctoral student in Engineering - Industry and Organizations at Universidad Nacional de Colombia. His current research interests are Performance Measurement, Supply Chain Quality Management and Advanced Statistical Quality Control.

**Alexander A. Correa Espinal** is a Full Professor at the Department of Organizational Engineering, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. He received the PhD in Statistics and Operational Research in 2007 from the Universitat Politècnica de Catalunya (Spain) and the MSc in Industrial Engineering in 1999 from the Universidad de los Andes (Colombia). His current research interests are Advanced Design of Experiments, Advanced Statistical Quality Control and Total Quality Management.

## **D. Anexo: Paper 4**

Cogollo-Flórez, J. & Correa-Espinal, A. (2019). Modeling Supply Chain Quality Management using Multi-Layer Fuzzy Cognitive Maps. En *Proceedings of The 2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)* (pp. 1-6). New Orleans (USA). ISBN 978-1-5386-1728-1. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858995.

# Modeling Supply Chain Quality Management using Multi-Layer Fuzzy Cognitive Maps

Juan Cogollo  
*Department of Quality and  
 Production*  
*Instituto Tecnológico  
 Metropolitano-ITM*  
 Medellín, Colombia  
 juanogollo@itm.edu.co

Alexander Correa  
*Department of Organizational  
 Engineering*  
*Universidad Nacional de  
 Colombia*  
 Medellín, Colombia  
 alcorrea@unal.edu.co

**Abstract**—Supply Chain Quality Management (SCQM) modeling is one of the main research avenues in both academic and practitioner fields. Therefore, a SCQM model using a Multi-Layer Fuzzy Cognitive Map (ML-FCM) is developed in this paper. The ML-FCM model developed in this work allows expanding and decomposing SCQM concepts by grouping them as Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) in multi-layers. The model was applied in a three-echelon supply chain in the sector of personal care products. The model construction and its capacity to represent the studied problem are analyzed through density and strength metrics. The inference process results validated the initial selection of the concepts in every FCM and allowed to quantify the effect of each echelon on SCQM performance. The most important decision making variables for SCQM improvement in the studied supply chain were total profit, quality costs, suppliers rejections and returns, productivity, and customer rejections and returns .

**Keywords**—*modeling, supply chain quality management, multi-layer fuzzy cognitive maps, performance*

## I. INTRODUCTION

Supply Chain Management (SCM) is the management of the relationships and flows of materials and information between a string of operations and processes of a supply network that create value in the form of products and services to the end consumer [1]. The body of knowledge of SCM has evolved from a first stage based on transportation management, warehousing and material handling to the current research avenues associated with strategic problems like design and coordination of global supply chains, making decisions about outsourcing and offshoring, environmental and social responsibility, product recalls, among others [2]–[6].

Furthermore, Quality Management (QM) has evolved from an operational, intraorganizational approach based on error detection to the current widespread approach that made QM a strategic issue in the organization which requires to involve customers and suppliers [1], [7], [8]. Thereby, Supply Chain Quality Management (SCQM) has emerged as a new concept that integrates SCM and QM, in order to analyze the strategies

aimed to coordinate and integrate with suppliers and customers for quality improvement [9]–[13].

From the point of view of mathematical modeling, several researchers have developed quantitative SCQM models by applying both descriptive and rule-based techniques. Through a literature review in the databases Science Direct, IEEE, Springer, Taylor & Francis and Emerald, we found some recent works on descriptive SCQM models by applying statistical analysis techniques like confirmatory factor analysis [14], [15], structural equations [16], [17], correlation analysis [18]–[20] and Analytic Hierarchy Process [21]. Regarding the rule-based SCQM models, the main contributions are based on application of dynamical equations [22]–[30], agent-based modeling [31]–[34], network-based modeling [35], [36] and Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) [37].

Despite the previous contributions to SCQM modeling, there is a lack of research on development of models using advanced modeling techniques that overcome the descriptive approach and allow to explain the behavior of the system and to predict future states [7], [37]. Therefore, the objective of this paper is to develop a SCQM model using a Multi-Layer Fuzzy Cognitive Map which constitutes a novel approach to model SCQM, since it decomposes the problem or main FCM (layer 1) in three sub-FCMs (layer 2) that expand the concepts of the main FCM.

This paper is structured as follows: Section 2 presents a brief background about Multi-Layer Fuzzy Cognitive Maps. Section 3 describes the methods used for developing the ML-FCM model for SCQM. Section 4 shows the results and discussion. The paper ends with concluding remarks in Section 5.

## II. MULTI-LAYER FUZZY COGNITIVE MAPS

Fuzzy Cognitive Map (FCM) is a soft computing tool for modeling complex systems that combines fuzzy set theory with neural networks. A FCM is a directed weighted graph defined as  $G = (V, E)$  where  $V$  is a set of vertices and  $E$  is a set of directed edges between the vertices. The vertices are concepts ( $C$ ) which represent the studied system and the directed edges represent the casual relationships between the concepts. Each directed edge is



associated with a weight function  $w_{ij}$  which represents the strength of connection from concept  $i$  to concept  $j$  and takes a value in the interval  $[-1, +1]$ .

ML-FCMs can be considered as an extended form of FCMs by using sub-FCMs. Sub-FCMs are smaller FCMs organized in layers, which expand and decompose some concepts in the immediate higher layer (Fig. 1) [38]. This allows obtaining a more detailed model and considering different performance and decision-making levels in a single framework.

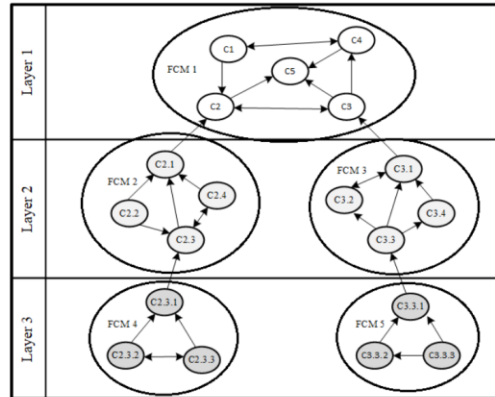


Fig. 1. Example of a ML-FCM representation with three layers.

ML-FCMs have been used in recent years for modeling complex systems in several scientific fields since they allow analyzing parameters of a system at higher specificity levels. A ML-FCM framework was developed and applied for representing and simulating the Cloud Adoption decision problem [38]. In [39] there is a proposal for a Decision Support System to migrate to microservices of software architectures by organizing the concepts as a ML-FCM.

Rezaee et al [40] developed a Multi-stage cognitive map with concepts grouped by stages which are associated with each other through causal relationships. This model is applied in a process failure mode and effects analysis for prioritizing failures. Also, Irajil [41] developed a multi-layer model which combine machine learning techniques, in order to determine the optimal combination of input features and to identify the appropriate model for prediction problems with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS).

### III. METHODS

In this section, we describe data and methods used for developing the ML-FCM model for SCQM and the application results are shown in the next section. The model is applied in the supply chain of a company in the sector of personal care products and comprises three-echelon (suppliers-manufacturer-distribution).

The development of the SCQM model using ML-FCM was carried out through five steps: (a) Selection of concepts, (b)

Determination of causal relationships weights, (c) Construction of the ML-FCM model, (d) Analysis of the ML-FCM model, and (e) Inference process and Convergence analysis.

#### A. Selection of Concepts

Table 1 shows the FCMs of each layer and their respective concepts. Selection of concepts was made based on a literature review on mathematical modeling of SCQM over the last 20 years. For example, concepts of FCM 1 represent SCQM performance through the different objective functions identified in the models analyzed in the literature review [22], [23], [32], [35], [36], [42], [43], [24]–[31]. Concepts of FCM 2 represent Suppliers performance, concepts of FCM 3 represent Manufacturer performance and concepts of FCM 4 represent Distribution performance.

TABLE I. LAYERS, FCMs AND CONCEPTS

Layer	# FCM	ID	Concepts	
Layer 1	FCM 1 (Main FCM)	C1	Suppliers performance	
		C2	Manufacturer performance	
		C3	Distribution performance	
		C4	Total profit (%)	
		C5	Customer satisfaction (%)	
		C6	Suppliers Development (%)	
		C7	Total Logistics costs (%)	
		C8	Quality Costs (%)	
		C9	SCQM Performance (central concept)	
Layer 2	FCM 2 (SubFCM)	C1	Suppliers performance (central concept)	
		1.1	Suppliers perfect orders (%)	
		1.2	Suppliers rejections and Returns (%)	
		1.3	Suppliers fill rate (%)	
		1.4	Ordering cost (\$)	
	FCM 3 (SubFCM)	C2	Manufact. performance (central concept)	
		2.1	Manufacturing unit cost (\$/unit)	
		2.2	Defective product in production (%)	
		2.3	Emissions, effluent and waste (%)	
		2.4	Productivity (%)	
		2.5	Fill rate (%)	
		FCM 4 (SubFCM)	C3	Distrib. performance (central concept)
			3.1	Customer perfect deliveries (%)
			3.2	OTIF (%)
			3.3	Distribution lead time (hours)
3.4	Customer rejections and Returns (%)			
3.5	Distribution unit cost (\$/unit)			

#### B. Determination of Causal Relationships Weights

Determination of casual relationships weights can be made through historical data analysis or expert opinion. In this case, the causal relationships weights were determined by historical data analysis of the studied supply chain through performing multivariable correlation analysis of the concepts in each FCM. The analyzed data set consisted of performance results obtained by the studied supply chain in every concept of the FCMs, over the last 48 months. The correlation matrices obtained become the adjacency matrices as ML-FCM model inputs. So, four adjacency matrices containing the results of the causal relationships weights between concepts were obtained. As an example, Table 2 shows the adjacency matrix for FCM 2 (Suppliers performance).

TABLE II. ADJACENCY MATRIX FOR FCM2

Concepts	ID	C1	1.1	1.2	1.3	1.4
Suppliers performance	C1	0	0	0	0	0
Suppliers perfect orders	1.1	1	0	1	0	0.8
Suppliers rejections and returns	1.2	1	-0.9	0	-0.5	-0.5
Suppliers fill rate	1.3	1	0.8	1	0	1
Ordering cost	1.4	-0.6	0.5	1	-0.5	0

### C. Construction of the ML-FCM Model

Construction of the ML-FCM model for SCQM is carried out by combining information in Table 2 with the causal relationships weights calculated in the previous step. Therefore, the layer 1 has the main FCM (FCM 1) and represents the SCQM performance; the layer 2 has three subFCMs (FCMs 2, 3, and 4), which correspond to the three-echelon of the studied supply chain.

Concepts of each FCM are grouped in the corresponding layer and are linked using the adjacency matrices. Connection between layers is done through the concepts of layer 1 that are extended in layer 2, that is, C1, C2 and C3.

### D. Analysis of the ML-FCM Model

Analysis of the developed ML-FCM model for SCQM allows to describe its properties and to assess the strength of the concepts to represent the system. This analysis is carried out by calculating complexity and strength of the ML-FCM framework. Complexity is measured in terms of density as the ratio between the numbers of edges in the FCM to the maximum number of possible edges:

$$Density = \frac{|E|}{|V|(|V|-1)} \quad (1)$$

Strength refers to significance of each node (concept) in the ML-FCM and is measured as the total value of the node, as follow:

$$Total\ value\ (i) = Value_{in}\ (i) + Value_{out}\ (i) \quad (2)$$

$Value_{in}$  and  $Value_{out}$  are the sum of the weights of incoming and outgoing edges to node  $i$ , respectively, and are calculated as follow:

$$Value_{in}\ (i) = \sum_{j=1}^{|V|} |w_{ji}| \quad (3)$$

$$Value_{out}\ (i) = \sum_{j=1}^{|V|} |w_{ij}| \quad (4)$$

### E. Inference Process and Convergence Analysis

Inference process is carried out after data from the input concepts are feed. Values of the concept  $C_i$  in time  $t$  are represented by the state vector  $A_i(k)$ . The state of the FCM is

described by the state vector  $A(k) = [A_1(k), \dots, A_n(k)]$ . The value  $A_i$  in a moment  $k+1$  is calculated by the sum of the previous value of  $A_i$  in a prior moment  $k$  with the product of the value  $A_j$  of the cause node  $C_j$  in precedent moment  $k$  and the value of the cause-effect link  $w_{ij}$  [44]:

$$A_i(k+1) = f(A_i(k) + \sum_{j=1}^N A_j(k) \cdot w_{ji}) \quad (5)$$

$f(\cdot)$  is a transfer function, which gives values of concepts in the range  $[0, 1]$  and is formulated as follows:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-mx}} \quad (6)$$

where  $m$  is a real positive number and  $x$  is the value  $A_i^{(k)}$  on the equilibrium point. Due to characteristics of the modeled system (SCQM), the stopping criterion was established when a fixed-point is reached. The network convergence allows predicting the system future stable state and making right decisions.

The inference and simulation process is performing by using a bottom-up approach, that is, from layer 2 to layer 1. First, the inference process is carried out independently in the subgraphs of layer 2. Then, the inference process is carried out in layer 1, using the equilibrium point results of layer 1 as input activation levels of the transfer concepts.

## IV. RESULTS

The main results of this work are the framework of the ML-FCM model for SCQM and the convergence values of the concepts in each FCM, after performing the simulations.

### A. ML-FCM Model for SCQM

Fig. 2 shows the ML-FCM model for SCQM developed in this work using data and following the steps described in the previous section. The layers, FCMs, concepts and causal relationships are shown. The model construction is analyzed by calculating its density and strength and the results are shown in Tables 3 and 4, respectively.

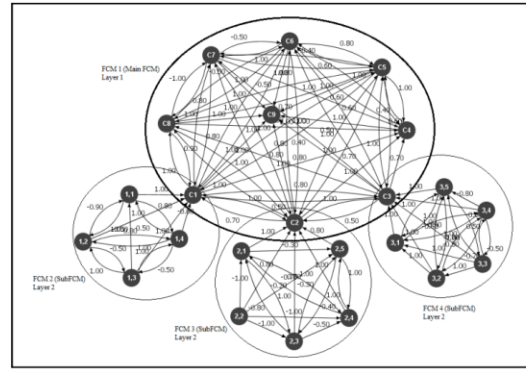


Fig. 2. The ML-FCM model for SCQM.



The density values were calculated using (1). According to the results of Table 3, every FCM of the model has density values above the threshold for medium complexity, so it is possible to conclude that the ML-FCM model for SCQM developed in this work is a highly complex structure.

TABLE III. COMPLEXITY METRICS OF THE ML-FCM MODEL FOR SCQM

FCM	Layer	(a) # nodes	(b) # edges	(c) = b/[a x (a-1)] Density
1	1	9	57	0.79
2	2	5	15	0.75
3	2	6	19	0.63
4	2	6	22	0.73

TABLE IV. STRENGTH METRICS OF THE ML-FCM MODEL FOR SCQM

Layer	# FCM	Concepts	(a) val <sub>in</sub> (i)	(b) val <sub>out</sub> (i)	(c) = a + b val <sub>total</sub> (i)
Layer 1	FCM 1 (SCQM performance)	Suppliers performance	4.3	7.6	11.9
		Manufacturer performance	5.2	7.5	12.7
		Distribution performance	3	6	9
		Total profit	6.5	2	8.5
		Customer satisfaction	5.1	5.8	10.9
		Suppliers Development	4.5	7.3	11.8
		Total Logistics costs	5.8	5.5	11.3
		Quality Costs	5.3	5.9	11.2
		SCQM Performance	8	0	8
		Layer 2	FCM 2 (Suppliers performance)	Suppliers performance	3.6
Suppliers perfect orders	2.2			2.8	5
Suppliers rejections and Returns	3			2.9	5.9
Suppliers Fill rate	1			3.8	4.8
FCM 3 (Manufact. performance)	Ordering cost		2.3	2.6	4.9
	Manufacturer performance		4.3	0	4.3
	Manufacturing unit cost		2.8	2.5	5.3
	Defective product in production		0	4.5	4.5
	Emissions, effluent and waste		1.6	2.3	3.9
	Productivity		3.5	3	6.5
FCM 4 (Distrib. performance)	Fill rate	2.3	2.2	4.5	
	Distribution performance	4.9	0	4.9	
	Customer perfect deliveries	3.6	3	6.6	
	OTIF	2.5	4	6.5	
	Distribution lead time	1.1	4.2	5.3	
	Customer rejections and Returns	3	4	7	
Distribution unit cost	3.6	3.5	7.1		

Strength metrics were calculated using (2), (3) and (4). The shaded rows in Table 4 identify concepts with the most significance in each FCM, that is, those that have the greatest impact on the performance of each supply chain echelon and on SCQM performance. The top three concepts on the main FCM are *Manufacturer performance*, *Suppliers performance* and *Suppliers development*. The latter is not decomposed in layer 2 due to the analysis approach of supply chain echelon used in this research, but this result constitutes a starting point for future works aimed at deepening either the individual or grouped behavior of this concept.

## B. Results of the Inference Process

Regardless of results of the model construction indicators, the real dynamic behavior of the system is obtained after the inference process. Fig. 3 shows the results of the inference process, evidencing the convergence of all concepts in the FCMs.

According to the final values of vectors on the main FCM, the highest concept values that affect the central concept are *Total profit* (0.9994) and *Quality costs* (0.9980). This result is consistent with the literature review, since 54% of the retrieved quantitative SCQM models have as objective functions to maximize total profit or minimize quality costs.

Similarly, the highest concept values that affect Suppliers Performance are *Suppliers rejections and returns* (0.9370) and *Ordering cost* (0.7633). The highest concept values that affect Manufacturer Performance are *Productivity* (0.7742) and *Fill rate* (0.6676). The highest concept values that affect Distribution Performance are *Customer rejections and returns* (0.8716) and *Distribution unit cost* (0.7741).

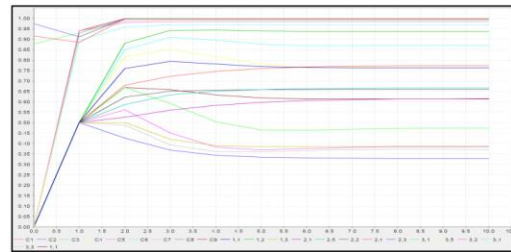


Fig. 3. Results of the inference process.

## V. CONCLUSIONS

ML-FCM is a powerful soft computing tool for modeling complex systems that allows expanding and decomposing concepts by applying a grouping approach in multi-layers. In this paper, we developed a SCQM model using a ML-FCM as a novel modeling approach in this knowledge area. The model was applied in a three-echelon supply chain of a company in the sector of personal care products.

Analysis of density and strength indicators in the model construction allowed to validate its high levels of network complexity and significance of the concepts used in SCQM modeling. In addition, convergence of the concepts vectors in the inference process validated the initial selection of the concepts in the main FCM and the subFCMs.

This work can help decision makers in the SCQM context to have a better understanding of factors that affect quality improvement in supply chains and the quantitative relationships between decision variables and global performance. Future works will focus on considering a greater number of concepts and supply chain echelons and other transfer functions and learning algorithms.

## REFERENCES

- [1] N. Slack, A. Brandon-Jones, and R. Johnston, *Operations Management*, 8th ed. Harlow, UK: Pearson, 2016.
- [2] S. Chopra and P. Meindl, *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*, 6th ed. New York: Pearson, 2016.
- [3] A. Wieland, R. B. Handfield, and C. F. Durach, "Mapping the Landscape of Future Research Themes in Supply Chain Management," *J. Bus. Logist.*, vol. 37, no. 3, pp. 205–212, 2016.
- [4] E. Cruz Trejos, A. A. Correa Espinal, and J. M. Cogollo Florez, "Supply Chain Social Responsibility," *Gestión y Región*, vol. 13, pp. 89–106, 2012.
- [5] N. Slack and M. Lewis, *Operations Strategy*, 5th ed. Harlow, UK: Pearson, 2017.
- [6] B. Flynn and X. Zhao, *Global Supply Chain Quality Management: Product Recalls and Their Impact*. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [7] J. R. Evans, S. T. Foster, and K. Linderman, "A Content Analysis of Research in Quality Management and a Proposed Agenda for Future Research," *Qual. Manag. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 17–44, 2014.
- [8] D. Zimon, "The Impact of TQM Philosophy for the Improvement of Logistics Processes in the Supply Chain," *Int. J. Qual. Res.*, vol. 11, no. 1, pp. 3–16, 2017.
- [9] M. W. Ford, "Supply Chain Quality Management and Environmental Uncertainty: A Contingency Perspective," *Qual. Manag. J.*, vol. 22, no. 4, pp. 54–65, 2015.
- [10] G. Carmignani, "Supply chain and quality management: The definition of a standard to implement a process management system in a supply chain," *Bus. Process Manag. J.*, vol. 15, no. 3, pp. 395–407, 2009.
- [11] C. J. Robinson and M. K. Malhotra, "Defining the concept of supply chain quality management and its relevance to academic and industrial practice," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 96, no. 3, pp. 315–337, 2005.
- [12] L. A. Fish, "Supply Chain Quality Management," in *Supply Chain Management - Pathways for Research and Practice*, D. Onkal and E. Aktas, Eds. Rijeka: InTech, 2011, pp. 25–42.
- [13] J. M. Cogollo-Flórez and A. A. Correa-Espinal, "Supply Chain Quality Management: Developments and Trends," *Espacios*, vol. 38, no. 37, pp. 16–38, 2017.
- [14] R. Narasimhan and A. Nair, "The antecedent role of quality, information sharing and supply chain proximity on strategic alliance formation and performance," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 96, no. 3, pp. 301–313, 2005.
- [15] J. G. Mendes Dos Reis, "Modelo de Avaliação da Qualidade para Redes de Suprimentos." Universidade Paulista: Tese de Doutorado em Engenharia de Produção, 2011.
- [16] H. Q. Truong, P. Sampaio, M. Sameiro, and A. Fernandez, "An extensive structural model of supply chain quality management and firm performance," *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 33, no. 4, pp. 444–464, 2016.
- [17] M. Zhang, H. Guo, B. Huo, X. Zhao, and J. Huang, "Linking supply chain quality integration with mass customization and product modularity," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 207, pp. 227–235, 2019.
- [18] A. J. Chaghoooshi, M. Soltani-Neshan, and M. Moradi-Moghadam, "Canonical correlation analysis between supply chain quality management and competitive advantages," *Found. Manag.*, vol. 7, no. 1, pp. 83–92, 2015.
- [19] B. Huo, Y. Ye, X. Zhao, and K. Zhu, "Supply chain quality integration: A taxonomy perspective," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 207, pp. 236–246, 2019.
- [20] A. Bayo-Moriones, A. Bello-Pintado, and J. Merino-Díaz-de-Cerio, "Quality assurance practices in the global supply chain: the effect of supplier localisation," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 1, pp. 255–268, 2011.
- [21] C.-H. Kuei, C. N. Madu, and C. Lin, "Developing global supply chain quality management systems," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 15, pp. 4457–4481, 2011.
- [22] K. L. Cheung and K. F. Leung, "Coordinating replenishments in a supply chain with quality control considerations," *Prod. Planin. Control*, vol. 11, no. 7, pp. 697–705, 2000.
- [23] T. P. Tsai and F.-C. Wang, "Improving Supply Chain Manufacturer: A Model for Collaborative Quality Control," in *Advanced Semiconductor Manufacturing, 2004. ASMC '04. IEEE Conference and Workshop, 2004*, pp. 36–42.
- [24] K. Das and S. Sengupta, "Modelling supply chain network: a quality-oriented approach," *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 27, no. 5, pp. 506–526, 2010.
- [25] Q. Su and Q. Liu, "Supply Chain Quality Management by Contract Design," in *Supply Chain Management - Pathways for Research and Practice*, D. Onkal and E. Aktas, Eds. Rijeka: InTech, 2011, pp. 57–74.
- [26] T. Xiao, D. Yang, and H. Shen, "Coordinating a supply chain with a quality assurance policy via a revenue-sharing contract," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 49, no. 1, pp. 99–120, 2011.
- [27] S. H. Yoo, "Product quality and return policy in a supply chain under risk aversion of a supplier," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 154, pp. 146–155, 2014.
- [28] N. M. Modak, S. Panda, and S. S. Sana, "Three-echelon supply chain coordination considering duopolistic retailers with perfect quality products," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 182, pp. 564–578, 2016.
- [29] E. Masoudipour, H. Amirian, and R. Sahraeian, "A novel closed-loop supply chain based on the quality of returned products," *J. Clean. Prod.*, vol. 151, pp. 344–355, 2017.
- [30] B. Sarkar, A. Majumder, M. Sarkar, N. Kim, and M. Ullah, "Effects of variable production rate on quality of products in a single-vendor multi-buyer supply chain management," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 99, pp. 567–581, 2018.
- [31] C.-H. Kuei, C. N. Madu, and J. K. Winch, "Supply chain quality management: a simulation study," *Inf. Manag. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 131–151, 2008.
- [32] P. Lou, Q. Liu, Z. Zhou, and S. Quan, "Production-Outsourcing Supply Chain Quality Management Based on Multi-Agent System," in *Proceedings of The 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2009*, pp. 1555–1559.
- [33] P. Sun and Q. Li, "Study on Supply Chain Quality Management Model Based on Immune Theory," in *Int. Conf. Manag. Serv. Sci.*, 2010, pp. 1–4.
- [34] J. C. Romero, T. Coudert, L. Geneste, and A. De Valroger, "Collaborative methodology for supply chain quality management: Framework and integration with strategic decision processes in product development," in *6th European Conference on Information Management and Evaluation, ECIME 2012, 2012*, pp. 418–427.
- [35] J. Yan, S. Sun, H. Wang, and Z. Hua, "Ontology of Collaborative Supply Chain for Quality Management," *World Acad. Sci. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 4, pp. 365–370, 2010.
- [36] Y. Liu, S. Fang, Z. Fang, and K. Hipel, "Petri net model for supply-chain quality conflict resolution of a complex product," *Kybernetes*, vol. 41, no. 7/8, pp. 920–928, 2012.
- [37] J. M. Cogollo-Flórez and A. A. Correa-Espinal, "Rule-based Modeling of Supply Chain Quality Management," in *Proceedings of The International Conference on Modeling and Applied Simulation, 2018*, pp. 120–125.
- [38] A. Christoforou and A. S. Andreou, "A framework for static and dynamic analysis of multi-layer fuzzy cognitive maps," *Neurocomputing*, vol. 232, pp. 133–145, 2017.
- [39] A. Christoforou, M. Garriga, A. S. Andreou, and L. Baresi, "Supporting the Decision of Migrating to Microservices Through Multi-layer Fuzzy Cognitive Maps," in *Service-Oriented Computing. IC3OC 2017. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 10601, M. Maximilien, A. Vallecillo, J. Wang, and M. Oriol, Eds. Cham: Springer, 2017, pp. 471–480.
- [40] M. J. Rezaee, S. Yousefi, and M. Babaei, "Multi-stage cognitive map for failures assessment of production processes: An extension in structure and algorithm," *Neurocomputing*, vol. 232, pp. 69–82, 2017.
- [41] M. S. Iraj, "Combining predictors for multi-layer architecture of adaptive fuzzy inference system," *Cogn. Syst. Res.*, vol. 53, pp. 71–84, 2019.
- [42] C. Gao, T. C. E. Cheng, H. Shen, and L. Xu, "Incentives for quality improvement efforts coordination in supply chains with partial cost allocation contract," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 54, no. 20, pp. 6213–6231, 2016.

## Bibliografía

- Ajalli, M., & Mozaffari, M. M. (2018). Appraisal the key factors of SCQM using a combined approach of SWARA-FISM. *International Journal of Supply Chain Management*, 7(4), 13–21.
- Amer, Y., Luong, L., & Lee, S. H. (2010). Case study: Optimizing order fulfillment in a global retail supply chain. *International Journal of Production Economics*, 127(2), 278–291. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.08.020>
- Bautista-Santos, H., Martínez-Flores, L., Fernández-Lambert, G., Bernabé-Loranca, M. B., Sánchez-Galván, F., & Sablón-Cossío, N. (2015). Integration model of collaborative supply chain. *Dyna*, 82(193), 145–154. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n193.47370>
- Bayo-Moriones, A., Bello-Pintado, A., & Merino-Díaz-de-Cerio, J. (2011). Quality assurance practices in the global supply chain: the effect of supplier localisation. *International Journal of Production Research*, 49(1), 255–268. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.508953>
- Borner, K., Chen, C., & Boyack, K. (2003). Visualizing Knowledge Domains. *Annual Review of Information Science and Technology*, 37(1), 179–255.
- Bowersox, D., Closs, D., Cooper, M., & Bowersox, J. (2020). *Supply Chain Logistics Management* (5th ed.). New York, NY: McGrawHill.
- Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299–312. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.032>
- Bray, R. L., Serpa, J. C., & Colak, A. (2019). Supply Chain Proximity and Product Quality. *Management Science*, 65(9), 4079–4099. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2018.3161>
- Çankaya, S. Y. (2020). The effects of strategic sourcing on supply chain strategies. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 13(2), 129–148. <https://doi.org/10.1108/JGOSS-01-2019-0002>

- Carmignani, G. (2009). Supply chain and quality management: The definition of a standard to implement a process management system in a supply chain. *Business Process Management Journal*, 15(3), 395–407. <https://doi.org/10.1108/14637150910960639>
- Chaghooshi, A. J., Soltani-Neshan, M., & Moradi-Moghadam, M. (2015). Canonical correlation analysis between supply chain quality management and competitive advantages. *Foundations of Management*, 7(1), 83–92.
- Chang, K. H., & Lin, G. (2015). Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 52, 40–51. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.12.002>
- Chardine-Baumann, E., & Botta-Genoulaz, V. (2014). A framework for sustainable performance assessment of supply chain management practices. *Computers and Industrial Engineering*, 76, 138–147. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.07.029>
- Chen, J., Fan, T., & Pan, F. (2021). Urban delivery of fresh products with total deterioration value. *International Journal of Production Research*, 59(7), 2218–2228. <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1828638>
- Cheung, K. L., & Leung, K. F. (2000). Coordinating replenishments in a supply chain with quality control considerations. *Production Planning and Control*, 11(7), 697–705. <https://doi.org/10.1080/095372800432160>
- Chiadamrong, N., & Wajcharapornjinda, P. (2012). Developing an economic cost model for quantifying supply chain costs. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 13(4), 540–571. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2012.050171>
- Chinello, E., Lee Herbert-Hansen, Z. N., & Khalid, W. (2020). Assessment of the impact of inventory optimization drivers in a multi-echelon supply chain: Case of a toy manufacturer. *Computers and Industrial Engineering*, 141, 106232. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106232>
- Chopra, S. (2018). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation* (7th ed.). New York: Pearson.
- Choudhary, D., Shankar, R., Tiwari, M. K., & Purohit, A. K. (2016). VMI versus information sharing: an analysis under static uncertainty strategy with fill rate constraints. *International Journal of Production Research*, 54(13), 3978–3993. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1168943>
- Christoforou, A., & Andreou, A. S. (2017). A framework for static and dynamic analysis of multi-layer fuzzy cognitive maps. *Neurocomputing*, 232, 133–145.

- <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.09.115>
- Christova, N., Stylios, C., & Groumos, P. (2003). Production Planning for Complex Plants using Fuzzy Cognitive Maps. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(3), 81–86. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37739-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37739-X)
- Cogollo-Flórez, Juan M., & Correa-Espinal, A. A. (2019). Analytical modeling of supply chain quality management coordination and integration: A literature review. *Quality Management Journal*, 26(2), 72–83. <https://doi.org/10.1080/10686967.2019.1580553>
- Cogollo-Flórez, Juan M, & Correa-Espinal, A. A. (2017). Modeling Supply Chain Quality Management Performance. In *Proceedings of the International Conference on Modeling and Applied Simulation 2017* (pp. 115–122). Barcelona, Spain.
- Cogollo-Flórez, Juan Miguel, & Correa-Espinal, A. A. (2018). Rule-based Modeling of Supply Chain Quality Management. In A. Bruzzone, F. De Felice, C. Frydman, F. Longo, M. Massei, & A. Solis (Eds.), *Proceedings of The International Conference on Modeling and Applied Simulation 2018* (pp. 120–125). Budapest, Hungary.
- Cogollo Flórez, J. M., & Ruiz Vásquez, C. (2019). Prácticas de responsabilidad sostenible de cadenas de suministro: Revisión y propuesta. *Revista Venezolana de Gerencia*, 24(87), 668–683.
- Cogollo, J., & Correa, A. (2019). Modeling Supply Chain Quality Management using Multi-Layer Fuzzy Cognitive Maps. In *2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)* (pp. 1–6). New Orleans, LA: IEEE. <https://doi.org/10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858995>
- Cooper, M., Lambert, D., & Pagh, J. (1997). Supply Chain Management: More Than a New Name for Logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.1108/09574099710805556>
- Council of Supply Chain Management Professionals. (n.d.). CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary. Retrieved June 13, 2020, from [https://cscmp.org/CSCMP/Academia/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921](https://cscmp.org/CSCMP/Academia/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921)
- Coyle, J., Langley, J., Novack, R., & Gibson, B. (2017). *Supply Chain Management: A Logistics Perspective* (10th ed.). Boston, USA: Cengage Learning.
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches* (5th ed.). Los Angeles, CA: SAGE.

- Cruz Trejos, E., Correa Espinal, A. A., & Cogollo Florez, J. M. (2012). Supply Chain Social Responsibility. *Gestión y Región*, 13, 89–106.
- Das, K., & Sengupta, S. (2010). Modelling supply chain network: a quality-oriented approach. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 27(5), 506–526. <https://doi.org/10.1108/09574090910954864>
- Das, Kanchan, & Lashkari, R. S. (2015). A Supply Chain Product Delivery and Distribution Planning Model. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 8(1), 22–27. <https://doi.org/10.31387/oscm0190129>
- Dellana, S., & Kros, J. (2014). An exploration of quality management practices, perceptions and program maturity in the supply chain. *International Journal of Operations & Production Management*, 34(6), 786–806. <https://doi.org/10.1108/09574090910954864>
- Dickerson, J. A., & Kosko, B. (1994). Virtual Worlds as Fuzzy Cognitive Maps. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 3(2), 173–189. <https://doi.org/10.1109/VRAIS.1993.380742>
- Duman, E. (2007). Decision making by simulation in a parcel transportation company. *Journal of The Franklin Institute*, 344(5), 672–683. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2006.02.030>
- Edmonds, W., & Kennedy, T. (2017). *An Applied Guide to Research Designs: Quantitative, Qualitative, and Mixed Methods* (2nd ed.). Los Angeles, CA: SAGE.
- Evans, J. R., Foster, S. T., & Linderman, K. (2014). A Content Analysis of Research in Quality Management and a Proposed Agenda for Future Research. *Quality Management Journal*, 21(2), 17–44.
- Fernandes, A. C., Sampaio, P., & Carvalho, M. do S. (2014). Quality Management and Supply Chain Management Integration: a conceptual model. In *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* (pp. 773–780). Bali, Indonesia.
- Flynn, B., & Zhao, X. (2015). *Global Supply Chain Quality Management: Product Recalls and Their Impact*. Boca Raton: CRC Press.
- Foster, S. T. (2008). Towards an understanding of supply chain quality management. *Journal of Operations Management*, 26(4), 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.06.003>
- Foster, S. T. (2017). *Managing Quality: Integrating the Supply Chain* (6th ed.). New Jersey:

- Pearson.
- Galindo-Pacheco, G. M., Paternina-Arboleda, C. D., Barbosa-Correa, R. A., & Llinás-Solano, H. (2012). Non-linear programming model for cost minimization in a supply chain, including non-quality and inspection costs. *International Journal of Operational Research*, 14(3), 301–323. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2012.047092>
- Gao, C., Cheng, T. C. E., Shen, H., & Xu, L. (2016). Incentives for quality improvement efforts coordination in supply chains with partial cost allocation contract. *International Journal of Production Research*, 54(20), 6213–6231. <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1191691>
- Gumrukcu, S., Rossetti, M. D., & Buyurgan, N. (2008). Quantifying the costs of cycle counting in a two-echelon supply chain with multiple items. *International Journal of Production Economics*, 116(2), 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.09.006>
- Gutiérrez, H., & De La Vara, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3rd ed.). México: McGrawHill.
- Gylling, M., Heikkilä, J., Jussila, K., & Saarinen, M. (2015). Making decisions on offshore outsourcing and backshoring: A case study in the bicycle industry. *International Journal of Production Economics*, 162, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.01.006>
- Harrison, A., Van Hoek, R., & Skipworth, H. (2014). *Logistics Management and Strategy: Competing Throug the Supply Chain* (5th ed.). Harlow, UK: Pearson.
- Hasani, A., Zegordi, S. H., & Nikbakhsh, E. (2012). Robust closed-loop supply chain network design for perishable goods in agile manufacturing under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 50(16), 4649–4669. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.625051>
- Hatwagner, M. F., Buruzs, A., Torma, A., & Koczy, L. T. (2015). Introduction of Modeling Complex Management Systems using Fuzzy Cognitive Map. *The 7th International Conference on Information Technology*, 2015, 508–514. <https://doi.org/10.15849/icit.2015.0092>
- Hugos, M. (2018). *Essentials of Supply Chain Management* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Huo, B., Ye, Y., Zhao, X., & Zhu, K. (2016). Supply chain quality integration: A taxonomy perspective. *International Journal of Production Economics*, *In Press*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.05.004>
- Jacobs, F., & Chase, R. (2018). *Operations and Supply Chain Management* (15th ed.). New

York, NY: McGrawHill.

- Jaqueta, S. D. J., Mashilo, E. N., Mocke, K., & Agigi, A. F. A. (2020). Physical distribution challenges and adaptations: A qualitative study of South Africa-based organisations operating in emerging African markets. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, 14(1), 1–16. <https://doi.org/10.4102/jtscm.v14i0.475>
- Jetter, A. J., & Kok, K. (2014). Fuzzy Cognitive Maps for futures studies-A methodological assessment of concepts and methods. *Futures*, 61, 45–57. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.05.002>
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for Performing Systematic Reviews. *Joint Technical Report*. Australia: Department of Computer Science. Keele University. <https://doi.org/10.1.1.122.3308>
- Kleijnen, J. (2005). An overview of the design and analysis of simulation experiments for sensitivity analysis. *European Journal of Operational Research*, 164(2), 287–300. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.02.005>
- Kleijnen, J. P. C., & Smits, M. T. (2003). Performance metrics in supply chain management. *Journal of the Operational Research Society*, 54(5), 507–514. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601539>
- Konti, A., & Damigos, D. (2018). Exploring strengths and weaknesses of bioethanol production from bio-waste in Greece using Fuzzy Cognitive Maps. *Energy Policy*, 112, 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.09.053>
- Kosko, B. (1986). Fuzzy cognitive maps. *Int. J. Man-Machine Studies*, 24, 65–75.
- Kuei, C.-H., & Madu, C. N. (2001). Identifying critical success factors for supply chain quality management (SCQM). *Asia Pacific Management Review*, 6(4), 409–423. <https://doi.org/10.4018/jsds.2010070104>
- Kuei, C.-H., Madu, C. N., & Lin, C. (2011). Developing global supply chain quality management systems. *International Journal of Production Research*, 49(15), 4457–4481. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.501038>
- Kuei, C.-H., Madu, C. N., & Winch, J. K. (2008). Supply chain quality management: a simulation study. *Information and Management Sciences*, 19(1), 131–151.
- Kumar, S., & Schmitz, S. (2011). Managing recalls in a consumer product supply chain - Root cause analysis and measures to mitigate risks. *International Journal of Production Research*, 49(1), 235–253. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.508952>



- Laguna, M., & Marklund, J. (2019). *Business Process Modeling, Simulation and Design* (3rd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Lambertini, L. (2018). Coordinating research and development efforts for quality improvement along a supply chain. *European Journal of Operational Research*, 270(2), 599–605. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.03.037>
- Lavin, E., & Giabbanelli, P. (2017). Analyzing and simplifying model uncertainty in fuzzy cognitive maps. In *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference* (pp. 1868–1879). Las Vegas, NV, USA. <https://doi.org/10.1109/WSC.2017.8247923>
- Law, A. (2015). *Simulation Modeling and Analysis* (5th ed.). New York, NY: McGrawHill.
- Law, A. (2017). A tutorial on Design of Experiments for simulation modeling. In *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference* (pp. 550–564). Las Vegas, NV, USA.
- Lejarza, F., & Baldea, M. (2020). Closed-loop optimal operational planning of supply chains with fast product quality dynamics. *Computers and Chemical Engineering*, 132, 106594. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106594>
- León, M., Rodríguez, C., García, M. M., Bello, R., & Vanhoof, K. (2010). Fuzzy Cognitive Maps for Modeling Complex Systems. In *Proceedings of 9th Mexican International Conference on Artificial Intelligence, MICAI 2010* (pp. 166–174). [https://doi.org/10.1007/978-3-642-16761-4\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16761-4_15)
- Li, B., & Jiang, Y. (2019). Impacts of returns policy under supplier encroachment with risk-averse retailer. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 47, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2018.11.011>
- Lin, C., Chow, W. S., Madu, C. N., Kuei, C.-H., & Pei Yu, P. (2005). A structural equation model of supply chain quality management and organizational performance. *International Journal of Production Economics*, 96(3), 355–365. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.05.009>
- Liu, S., & Lin, Y. (2006). *Grey Information: Theory and Practical Applications*. London, UK: Springer.
- Liu, Y., Fang, S., Fang, Z., & Hipel, K. (2012). Petri net model for supply-chain quality conflict resolution of a complex product. *Kybernetes*, 41(7/8), 920–928. <https://doi.org/10.1108/K-01-2015-0009>
- Lorscheid, I., Heine, B. O., & Meyer, M. (2012). Opening the “black box” of simulations: increased transparency and effective communication through the systematic design of experiments. *Computational and Mathematical Organization Theory*, 18(1), 22–62.

<https://doi.org/10.1007/s10588-011-9097-3>

- Lou, P., Liu, Q., Zhou, Z., & Quan, S. (2009). Production-Outsourcing Supply Chain Quality Management Based on Multi-Agent System. In *Proceedings of The 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2009. IE&EM '09*. (pp. 1555–1559).
- Luthra, S., Govindan, K., Kannan, D., Mangla, S. K., & Garg, C. P. (2017). An integrated framework for sustainable supplier selection and evaluation in supply chains. *Journal of Cleaner Production*, *140*, 1686–1698. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.078>
- Mallick, R. K., Manna, A. K., & Mondal, S. K. (2018). A supply chain model for imperfect production system with stochastic lead time demand. *Journal of Management Analytics*, *5*(4), 309–333. <https://doi.org/10.1080/23270012.2018.1530619>
- Maruchek, A., Greis, N., Mena, C., & Cai, L. (2011). Product safety and security in the global supply chain: Issues, challenges and research opportunities. *Journal of Operations Management*, *29*(7–8), 707–720. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2011.06.007>
- Masoudipour, E., Amirian, H., & Sahraeian, R. (2017). A novel closed-loop supply chain based on the quality of returned products. *Journal of Cleaner Production*, *151*, 344–355. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.067>
- Melnyk, S. a., Lummus, R. R., Vokurka, R. J., Burns, L. J., & Sandor, J. (2009). Mapping the future of supply chain management: a Delphi study. *International Journal of Production Research*, *47*(16), 4629–4653. <https://doi.org/10.1080/00207540802014700>
- Mendes Dos Reis, J. G. (2011). *Modelo de Avaliação da Qualidade para Redes de Suprimentos*. Universidade Paulista: Tese de Doutorado em Engenharia de Produção.
- Merigó, J. M., & Yang, J. B. (2017). A bibliometric analysis of operations research and management science. *Omega*, *73*, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2016.12.004>
- Modak, N. M., Panda, S., & Sana, S. S. (2016). Three-echelon supply chain coordination considering duopolistic retailers with perfect quality products. *International Journal of Production Economics*, *182*, 564–578. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.05.021>
- Moharana, H., Murty, J. S., Senapati, S. K., & Khuntia, K. (2012). Coordination, Collaboration and Integration for Supply Chain Management. *International Journal of*

- Interscience Management Review (IMR)*, 2(2), 46–50.
- Montevechi, J. A. B., De Almeida Filho, R. G., Paiva, A. P., Costa, R. F. S., & Medeiros, A. L. (2010). Sensitivity analysis in discrete-event simulation using fractional factorial designs. *Journal of Simulation*, 4(2), 128–142. <https://doi.org/10.1057/jos.2009.23>
- Montgomery, D. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Montoya-Torres, J. R., & Ortiz-Vargas, D. A. (2014). Collaboration and information sharing in dyadic supply chains: A literature review over the period 2000–2012. *Estudios Gerenciales*, 30, 343–354. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2014.05.006>
- Montoya-Torres, J. R., & Ortiz, D. (2011). Analysis of the collaboration concept in supply chain: A scientific literature review. In *Proceedings of Ninth Latin American and Caribbean Conference*. (pp. 1–10). August 3-5, Medellín, Colombia.
- Mota, B., Gomes, M. I., Carvalho, A., & Barbosa-Povoa, A. P. (2015). Towards supply chain sustainability: Economic, environmental and social design and planning. *Journal of Cleaner Production*, 105, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.052>
- Mourhir, A., Papageorgiou, E., Kokkinos, K., & Rachidi, T. (2017). Exploring Precision Farming Scenarios Using Fuzzy Cognitive Maps. *Sustainability*, 9(7), 1241. <https://doi.org/10.3390/su9071241>
- Mpelogianni, V., Marnetta, P., & Groumpos, P. P. (2015). Fuzzy Cognitive Maps in the Service of Energy Efficiency. *IFAC-PapersOnLine*, 48(24), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.12.047>
- Nagar, L., & Jain, K. (2008). Supply chain planning using multi-stage stochastic programming. *Supply Chain Management: An International Journal*, 13(3), 251–256. <https://doi.org/10.1108/13598540810871299>
- Narasimhan, R., & Nair, A. (2005). The antecedent role of quality, information sharing and supply chain proximity on strategic alliance formation and performance. *International Journal of Production Economics*, 96(3), 301–313. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.06.004>
- Narasimhan, V., Venkatasubbaiah, K., & Avadhani, P. S. (2013). Identification of Critical SSCM Activities Through Confirmatory Factor Analysis. *International Journal for Quality Research*, 7(2), 239–248.
- Obiedat, M., & Samarasinghe, S. (2016). A novel semi-quantitative Fuzzy Cognitive Map model for complex systems for addressing challenging participatory real life problems.

- Applied Soft Computing Journal*, 48, 91–110.  
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.06.001>
- Pang, J., & Tan, K. H. (2018). Supply chain quality and pricing decisions under multi-manufacturer competition. *Industrial Management & Data Systems*, 118(1), 164–187.  
<https://doi.org/10.1108/IMDS-03-2017-0092>
- Papageorgiou, E. I., Aggelopoulou, K. D., Gemtos, T. A., & Nanos, G. D. (2013). Yield prediction in apples using Fuzzy Cognitive Map learning approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 91, 19–29. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.11.008>
- Papageorgiou, E., Markinos, A., & Gemptos, T. (2009). Application of fuzzy cognitive maps for cotton yield management in precision farming. *Expert Systems with Applications*, 36(10), 12399–12413. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.04.046>
- Parast, M. M. (2013). Supply chain quality management: An inter-organizational learning perspective. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 30(5), 511–529. <https://doi.org/10.1108/09574090910954864>
- Parast, M. M. (2019). A learning perspective of supply chain quality management: empirical evidence from US supply chains. *Supply Chain Management: An International Journal*, 25(1), 17–34. <https://doi.org/10.1108/SCM-01-2019-0028>
- 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. <https://doi.org/10.1080/00207540412331327718>
- Pelta, D. A., & Cruz Corona, C. (2018). *Soft Computing Based Optimization and Decision Models*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-64286-4>
- Peng, X., Prybutok, V., & Xie, H. (2019). Integration of supply chain management and quality management within a quality focused organizational framework. *International Journal of Production Research*, 58(2), 448–466. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1593548>
- Pettersson, A. I., & Segerstedt, A. (2013). Measuring supply chain cost. *International Journal of Production Economics*, 143(2), 357–363. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.03.012>
- Phan, A. C., Abdallah, A. B., & Matsui, Y. (2011). Quality management practices and competitive performance: Empirical evidence from Japanese manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 133(2), 518–529. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.01.024>

- Poczeta, K., & Papageorgiou, E. I. (2018). Implementing Fuzzy Cognitive Maps with Neural Networks for Natural Gas Prediction. In *2018 IEEE 30th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)* (pp. 1026–1032). Volos, Greece: IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICTAI.2018.00158>
- Rashid, K., & Aslam, M. M. H. (2012). Business excellence through total supply chain quality management. *Asian Journal on Quality*, 13(3), 309–324. <https://doi.org/10.1108/09574090910954864>
- Reisman, A. (2004). How can OR/MS Educators Benefit From Creating and Using Taxonomies? *INFORMS Transactions on Education*, 4(3), 55–65. <https://doi.org/10.1287/ited.4.3.55>
- Robinson, C. J., & Malhotra, M. K. (2005). Defining the concept of supply chain quality management and its relevance to academic and industrial practice. *International Journal of Production Economics*, 96(3), 315–337. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2004.06.055>
- Romero, J. C., Coudert, T., Geneste, L., & De Valroger, A. (2012). Collaborative methodology for supply chain quality management: Framework and integration with strategic decision processes in product development. In *6th European Conference on Information Management and Evaluation, ECIME 2012* (pp. 418–427).
- Rushton, A., Croucher, P., & Baker, P. (2017). *The Handbook of Logistics and Distribution Management: Understanding the Supply Chain* (6th ed.). New York, NY: Kogan Page.
- Salmeron, J. (2010). Modelling grey uncertainty with Fuzzy Grey Cognitive Maps. *Expert Systems with Applications*, 37(12), 7581–7588. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.04.085>
- Sanders, N. (2018). *Supply Chain Management: A Global Perspective* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Sarkar, B., Majumder, A., Sarkar, M., Kim, N., & Ullah, M. (2018). Effects of variable production rate on quality of products in a single-vendor multi-buyer supply chain management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99, 567–581. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2527-3>
- Sayama, H. (2015). *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*. New York: Open SUNY Textbooks.
- Shah, J. (2016). *Supply Chain Management: Text and Cases* (2nd ed.). Noida, India: Pearson.

- Sharma, A., Garg, D., & Agarwal, A. (2012). Quality Management in Supply Chains: the Literature Review. *International Journal for Quality Research*, 6(3), 193–206.
- Sharma, A., Garg, D., & Agarwal, A. (2014). Product recall: Supply chain quality issue? *International Journal of Intelligent Enterprise*, 2(4), 277–293. <https://doi.org/10.1504/IJIE.2014.069059>
- Simchi-Levi, D., Chen, X., & Bramel, J. (2014). *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics Management* (3rd ed.). New York, NY: Springer.
- Skład, A. (2019). Assessing the impact of processes on the Occupational Safety and Health Management System's effectiveness using the fuzzy cognitive maps approach. *Safety Science*, 117, 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.03.021>
- Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2016). *Operations Management* (8th ed.). Harlow, UK: Pearson.
- Slack, N., & Lewis, M. (2017). *Operations Strategy* (5th ed.). Harlow, UK: Pearson.
- Song, T., Li, Y., Song, J., & Zhang, Z. (2014). Airworthiness considerations of supply chain management from Boeing 787 Dreamliner battery issue. *Procedia Engineering*, 80, 628–637. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.118>
- Steven, A. B., Dong, Y., & Corsi, T. (2014). Global sourcing and quality recalls: An empirical study of outsourcing-supplier concentration-product recalls linkages. *Journal of Operations Management*, 32(5), 241–253. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2014.04.003>
- Su, Q., & Liu, Q. (2011). Supply Chain Quality Management by Contract Design. In D. Önkál & E. Aktas (Eds.), *Supply Chain Management - Pathways for Research and Practice* (pp. 57–74). Rijeka: InTech.
- Suard, S., Hostikka, S., & Baccou, J. (2013). Sensitivity analysis of fire models using a fractional factorial design. *Fire Safety Journal*, 62, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2013.01.031>
- Sun, P., & Li, Q. (2010). Study on Supply Chain Quality Management Model Based on Immune Theory. *2010 International Conference on Management and Service Science*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICMSS.2010.5576336>
- Susniene, D., Torma, A., Buruzs, A., Hatwágner, M. F., & Kóczy, L. T. (2014). Using Fuzzy Cognitive Map Approach to model the casual relationships in stakeholder management at companies. In *5th IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications* (pp. 121–124). Vietri sul Mare, Italy.
- Tarashioon, S., Van Driel, W. D., & Zhang, G. Q. (2014). Multi-physics reliability simulation

- for solid state lighting drivers. *Microelectronics Reliability*, 54(6–7), 1212–1222. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.02.019>
- Truong, H. Q., Sampaio, P., Sameiro, M., & Fernandez, A. (2016). An extensive structural model of supply chain quality management and firm performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 33(4), 444–464.
- Truong, H., Sampaio, P., Carvalho, M. S., Fernandes, A. C., Binh An, D. T., & Vilhenac, E. (2016). An extensive structural model of supply chain quality management and firm performance. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 33(4), 444–464. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-11-2014-0188>
- Tsadiras, A. K. (2008). Comparing the inference capabilities of binary, trivalent and sigmoid fuzzy cognitive maps. *Information Sciences*, 178(20), 3880–3894. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.05.015>
- Tsai, T. P., & Wang, F.-C. (2004). Improving Supply Chain Management: A Model for Collaborative Quality Control. In *Advanced Semiconductor Manufacturing, 2004. ASMC '04. IEEE Conference and Workshop* (pp. 36–42). <https://doi.org/10.1109/ASMC.2004.1309531>
- Wieland, A., Handfield, R. B., & Durach, C. F. (2016). Mapping the Landscape of Future Research Themes in Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics*, 37(3), 205–212.
- Wood, L. C., Wang, J. X., Olesen, K., & Reiners, T. (2017). The effect of slack, diversification, and time to recall on stock market reaction to toy recalls. *International Journal of Production Economics*, 193, 244–258. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.07.021>
- Wu, Y., Yang, Y., Wang, Z., & Yuan, J. (2013). Macro Quality Chain Management and Coordination Optimization Research. *Journal of Software*, 8(8), 2023–2031. <https://doi.org/10.4304/jsw.8.8.2023-2031>
- Xiao, T., Yang, D., & Shen, H. (2011). Coordinating a supply chain with a quality assurance policy via a revenue-sharing contract. *International Journal of Production Research*, 49(1), 99–120. <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.508936>
- Yan, J., Sun, S., Wang, H., & Hua, Z. (2010). Ontology of Collaborative Supply Chain for Quality Management. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 4(4), 365–370.
- Yao, D. Q., & Zhang, N. (2009). Contract design for supply chain quality management.

- International Journal of Value Chain Management*, 3(2), 129–145.  
<https://doi.org/10.1504/IJVC.2009.026954>
- Yoo, S. H. (2014). Product quality and return policy in a supply chain under risk aversion of a supplier. *International Journal of Production Economics*, 154, 146–155.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.04.012>
- Yoo, S. H., & Cheong, T. (2018). Quality improvement incentive strategies in a supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 114, 331–342.  
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.01.005>
- Yu, Y., & Huo, B. (2018). Supply chain quality integration: relational antecedents and operational consequences. *Supply Chain Management: An International Journal*, 23(3), 188–206. <https://doi.org/10.1108/SCM-08-2017-0280>
- Zeng, J., Phan, C. A., & Matsui, Y. (2013). Supply chain quality management practices and performance: An empirical study. *Operations Management Research*, 6(1–2), 19–31.  
<https://doi.org/10.1007/s12063-012-0074-x>
- Zhang, M., Guo, H., Huo, B., Zhao, X., & Huang, J. (2017). Linking supply chain quality integration with mass customization and product modularity. *International Journal of Production Economics*, 207, 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.01.011>
- Zimon, D. (2017). The Impact of TQM Philosophy for the Improvement of Logistics Processes in the Supply Chain. *International Journal for Quality Research*, 11(1), 3–16. <https://doi.org/10.18421/IJQR11.01-01>