DESARROLLO DE UNA INVESTIGACIÓN INTEGRAL PARA LOS SISTEMAS DE MANUFACTURA Y LA CADENA DE SUMINISTROS, DESDE UN ENFOQUE DE GESTIÓN DE INVENTARIOS, INDUSTRIA 4.0 Y COMPLEJIDAD (2023-2025)

POR:

MIGUEL ANGEL BUELVAS GALLO

KEVIN ENRIQUE PUELLO MARTINEZ

TRABAJO DE GRADO POR PARTICIPACIÓN ACTIVA EN SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO INDUSTRIAL

ASESOR DISCIPLINAR Y METODOLÓGICO:

GERMÁN HERRERA VIDAL

UNIVERSIDAD DEL SINÚ – SECCIONAL CARTAGENA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.

2025

Universidad del Sinú – Elías Bechara Zainúm
Seccional Cartagena
Escuela de Ingeniería Industrial
Cartagena de Indias D.T. y C.
Junio, 2025

Cordial saludo:

La presente tiene como fin someter a revisión y aprobación para la ejecución del proyecto de grado titulado: **DESARROLLO DE UNA INVESTIGACIÓN INTEGRAL PARA LOS SISTEMAS DE MANUFACTURA Y LA CADENA DE SUMINISTROS, DESDE UN ENFOQUE DE GESTIÓN DE INVENTARIOS, INDUSTRIA 4.0 Y COMPLEJIDAD (2023–2025).** El cual está desarrollado por los estudiantes Miguel Ángel Buelvas Gallo y Kevin Enrique Puello Martínez, adscritos al programa de Ingeniería Industrial, en el área de pregrado.

Atentamente,

Firma:
Giovanna Salcedo Toro
Directora de Escuela Ingeniería Industrial

Firma:
Cielo Ester Marriaga Gonzales
Coordinadora de Investigaciones
Escuela de Ingeniería Industrial

Acta de calificación y aprobación

Nota de aceptación

_____

_____

_____

_____

_____

Director de Escuela

_____

Director de Investigaciones

_____

Firma del Jurado

_____

Firma del Jurado

Cartagena de Indias, 2025

DEDICATORIA

A nuestras familias, que han sido nuestro refugio en los días difíciles y la luz que ha guiado cada paso de este camino. Por cada sacrificio silencioso, por cada gesto de amor incondicional, por confiar en nosotros incluso en medio de la duda, y por enseñarnos que los sueños se construyen con paciencia, esfuerzo y corazón. Este logro también les pertenece, porque han sido hogar, fuerza y esperanza en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

A todos nuestros docentes, por ser guías fundamentales en nuestro proceso de formación, por compartir con generosidad su conocimiento y por inspirarnos a crecer como profesionales y como seres humanos. Cada clase, consejo y desafío representaron una parte esencial de este recorrido. De manera especial, expresamos nuestro más profundo agradecimiento al profesor Germán Herrera Vidal por su acompañamiento como asesor disciplinar y metodológico, por su paciencia, compromiso y la confianza depositada en nuestro trabajo. Su orientación marcó una diferencia significativa en el desarrollo de este proyecto y en nuestra forma de comprender la ingeniería como un aporte real a la sociedad. Gracias por ser un verdadero mentor.

TABLA DE CONTENIDO

1. PROYECTO 2023 10

1.1. Resumen 10

1.2. Planteamiento del problema 11

1.3. Justificación 14

1.4. Objetivos 15

1.4.1. Objetivo General 15

1.4.2. Objetivos Específicos 15

1.5. Aspectos Teóricos 15

1.6. Metodología 20

1.7. Competencias Investigativas 22

1.8. Productos resultados de investigación 23

2. PROYECTO 2024 26

2.1. Resumen 26

2.2. Planteamiento del problema 27

2.3. Justificación 29

2.4. Objetivos 31

2.4.1. Objetivo General 31

2.4.2. Objetivos Específicos 31

2.5. Aspectos Teóricos 32

2.6. Metodología 36

2.7. Competencias investigativas 38

2.8. Productos resultados de investigación 39

3. PROYECTO 2025 41

3.1. Resumen 41

3.2. Planteamiento del problema 42

3.3. Justificación 43

3.4. Objetivos 46

3.4.1. Objetivo General 46

3.4.2. Objetivos Específicos 46

3.5. Aspectos Teóricos 47

3.6. Metodología 51

3.7. Competencias investigativas 53

3.8. Productos resultados de investigación 54

4. RESULTADOS 57

4.1 Resultados del proyecto P001 57

4.2 Resultados del proyecto P002 72

4.3 Resultados del proyecto P003 76

5. CONCLUSIÓN 92

6. BIBLIOGRAFÍA 93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Total de empresas matriculadas por sectores 13

Tabla 2. Metodología para el logro de los objetivos 20

Tabla 3. Eventos de ponencia académica y objetivos intervenidos en el proyecto 24

Tabla 4. Metodología para el logro de los objetivos 36

Tabla 5. Publicación del artículo científico del proyecto P002 en la revista BILO y objetivos intervenidos 40

Tabla 6. Eventos de divulgación académica y objetivos específicos intervenidos 55

Tabla 7. Consultoría empresarial realizada a la Asociación Cacao de Mujeres Montemarianas y objetivos específicos intervenidos 55

Tabla 8. Modelo Lote a Lote (LFL) 59

Tabla 9. Modelo Periodo Constante (CP) 60

Tabla 10. Modelo Cantidad Económica de Pedido (EOQ) 62

Tabla 11. Modelo Cantidad Periódica de Pedido (EPQ) 63

Tabla 12. Modelo Mínimo Costo Unitario (CUM) 65

Tabla 13. Cálculos de lotes fragmentados para el modelo BPF 66

Tabla 14. Cálculos de costos y selección de lotes para el modelo WW 68

Tabla 15. Cálculo de Km y selección de lotes para el modelo SM 69

Tabla 16. Resultados de las variables obtenidos en Gams 71

Tabla 17. Indicadores resultados de la simulación 73

Tabla 18. Relación de características de veredas productoras 85

Tabla 19. Mapa geográfico de red logística de transporte 87

Tabla 20. Relación de problemáticas identificadas pro veredas 88

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Participación de los autores en la exposición de póster durante el XX Encuentro Departamental de Semilleros de Investigación – RedCOLSI Nodo Bolívar 24

Figura 2. Participación de los autores en el XXVII Encuentro Nacional y XXI Internacional de Semilleros de Investigación – RedCOLSI, realizado en Barranquilla 25

Figura 3. Confirmación oficial de clasificación a la fase internacional de RedCOLSI 25

Figura 4. Portada del artículo publicado en el BILO 40

Figura 5. Metodología para el logro de los objetivos 51

Figura 6. Certificado de aprobación de ponencia en el XVI Congreso Internacional de Gestión del Conocimiento – 2025 55

Figura 7. Documentos soporte de consultoría 56

Figura 8. Determinación de frecuencias de pedidos según CUM 64

Figura 9. Determinación de periodos fragmentados 66

Figura 10. Determinación de Costos variables promedios (Km) 69

Figura 11. Resultado del modelo de optimización y simulación 72

Figura 12. Resultado de la simulación en ProModel 73

Figura 13. Comparación de eficiencias entre entidades 74

Figura 14. Optimización de botes totales con SimRunner 75

Figura 15. Indicadores de producción de la cadena del caco 77

Figura 16. Indicadores del cultivo de cacao en los Montes de María 78

Figura 17. Estructura de la cadena del cacao 80

Figura 18. Actores de tipo productor en la cadena del cacao 81

Figura 19. Actores de transportadores primarios en la cadena del cacao 82

Figura 20.Actor centro de acopio en la cadena del cacao 83

Figura 21. Actor micro empresario en la cadena del cacao 84

1. PROYECTO 2023

Análisis de modelos determinísticos y estocásticos para la planeación y control de inventarios: caso empresa del sector manufacturero de la ciudad de Cartagena

1.1. Resumen

Actualmente los modelos de negocios del mundo moderno están en continuo desarrollo, entrando en nuevas tendencias, nuevas áreas industriales y hasta nuevos modelos en un entorno cada vez más dinámico y competitivo. Es por esto que para estar alineados con el crecimiento cada vez más rápido de los mercados, las organizaciones deben gestionar y tomar decisiones en la aplicación de modelos administrativos de tipo cualitativos y cuantitativos desarrolladas para tal fin. Hoy por hoy la gestión de sistemas de inventarios constituye una de las funciones más complejas en las empresas, por lo que implica mantener existencias para poder cubrir demandas inciertas en periodos de tiempo específicos. El sector manufacturero de pequeñas y medianas empresas se caracteriza por ser dinámico, por presentar altos volúmenes de artículos o insumos y por evidenciar ausencias de políticas o sistemas que apoyen a una gestión eficiente de los inventarios, trayendo consigo una alta complejidad la hora de administrar las líneas de la misma manera, desajustes en los planes de abastecimiento, bajos niveles de servicios al cliente y aumentos de los costos de almacenamiento. Es por esto, que el objetivo principal del presente proyecto es analizar mediante modelos cuantitativos en ambientes determinísticos y estocásticos, a partir de procedimientos matemáticos y estadísticos para la planeación y control de inventarios en almacenes de materiales directos, aplicado a empresa pequeña y mediana (Pyme) de la ciudad de Cartagena. Metodológicamente para llevar a cabo el proyecto inicialmente se desarrolla una revisión de la literatura con respecto a los modelos teóricos para planificación y el control de inventarios que se pueden ajustar a las necesidades reales de las Pymes, así como los

elementos por considerar para alcanzar la integración de estos modelos y conformar un sistema para la toma de decisiones. Se propone así, una metodología que utiliza un enfoque multicriterio fundamentado en la planificación y control de los inventarios. Finalmente, mediante unas técnicas de métodos cuantitativos se plantean, comparan y solucionan modelos basados en indicadores claves de gestión como los niveles de servicios y los costos de almacenamiento.

1.2. Planteamiento del problema

Cartagena, entre el siglo XX y el siglo XXI, se ha convertido en una de las ciudades de Colombia con mayor crecimiento demográfico, con una tasa promedio anual de 3,2% siendo esta cifra mayor a la indicada por el promedio nacional. Esto, debido a que las personas han percibido oportunidades económicas para una mayor estabilidad y calidad de vida. Así mismo, tiene el principal puerto de toda la Costa Caribe colombiana, dándole la posibilidad al país de crecer en la economía como exportador y aprovechar el potencial de los productos nacionales, creando relaciones redituables con el resto del mundo. Por otra parte, es una ciudad caracterizada por el turismo y ofrece la mayoría de su producción industrial.

La ciudad cuenta con ventajas naturales que ha posibilitado a que inversionistas, tanto de Colombia como extranjeros, formen aglomeraciones industriales. Dichos beneficios son, primeramente, los bajos costos de recursos como el transporte, las ideas, los bienes y las personas; en segunda instancia, por la proximidad con la costa, por los recursos naturales y por las ventajas del clima. Los sectores más importantes y en donde se ubican los conglomerados industriales en Cartagena son Mamonal, centro industrial y portuario. Destacando la producción de petróleo y sus derivados, el plástico, las materias primas industriales, productos químicos, bebidas y alimentos. Así mismo, no solo se desenvuelve en estos sectores dinámicos sino, también, en otras actividades económicas como el sector

agropecuario, artesanal, minero, entre otros las cuales brindan un menor valor agregado a la economía de la región.

Cabe resaltar que de igual forma existe un grupo de empresas apoyan al desarrollo de esta ciudad, como es el caso de las pequeñas y medianas empresas (Pymes), se hace pertinente afirmar que son estas las que aportan un porcentaje mayor para el crecimiento de un país. En este caso, Colombia es un país donde emergen aceleradamente este tipo de Pymes, pero no todas logran el éxito en el mercado y fracasan al corto tiempo de haber ingresado, siendo esto consecuencia de los constantes cambios económicos y sociales que producen un ambiente de incertidumbre.

Cartagena ha experimentado una serie de acontecimientos durante su historia que han permitido que se vuelva más productiva, lo cual ha sido trascendental para que surjan inversiones de gran escala. Primeramente, en el siglo XIX más específicamente desde 1810 hasta 1880, tuvo que atravesar un periodo donde la economía no era estable; sin embargo, en el siglo XX dio un giro inesperado debido a la reactivación portuaria. Este factor se vio complementado por la industria manufacturera que, en su momento, estaba sustentada por la segunda refinería de Colombia ubicada en Cartagena. Todo esto promovió a que, hoy en día, existan grandes industrias como lo son la petroquímica-plástica, la agroindustria, logístico-portuario, el turismo y naviero-astilleros.

Un aspecto negativo para la economía del Caribe colombiano, el cual inició en la década de 1980, fue el retroceso de la actividad industrial, puesto que entre 1994 y 1998 se desaparecieron seis establecimientos industriales, los cuales pertenecían a las empresas más importantes de la ciudad. Esto trajo como consecuencia que los activos de las industrias manufactureras de Cartagena perdieran valor, experimentando una tendencia descendiente de -6,15% anualmente. Otro aspecto reciente y actual es la crisis que inicio en el año 2020,

producto de la pandemia Covid- 19, la cual ha tenido un fuerte impacto sobre la economía del país, en especial sobre las micro, pequeñas y medianas empresas.

Las Pymes en conjunto con las microempresas, conforman el 94% de los establecimientos manufactureros en Colombia, generando un 54% del empleo, es por esto que son el mayor impulsador para la mejora en la calidad de vida de los ciudadanos, y además forma el 40% del valor agregado industrial.

Tabla 1

Total de empresas matriculadas por sectores

Sector	Número de empresas
Otras actividades	3.433
Inmobiliarias	926
Actividades artísticas, recreación	1.062
Actividades profesionales, científicas	1.144
Transporte y almacenamiento	1.144
Construcción	2.561
Alojamiento	2.751
Industrias Manufactureras	3.106
Comercio	10.953

Nota. Datos tomados de la Cámara de Comercio de Cartagena (2021).

En la tabla 1. Se puede evidenciar que uno de los sectores con mayor participación actualmente en la ciudad de Cartagena corresponde al comercio con 10.953 y a la industria manufacturera con 3.106 establecimientos.

En Cartagena de Indias, uno de los mayores problemas que actualmente tiene el sector industrial Pyme es precisamente la ineficacia de la cadena de suministro, la falta de integración entre los agentes participantes de la cadena, la falta de proveedores locales de calidad, el uso de plataformas informática antiguas, la poca coordinación entre agentes y departamentos, la gestión de sus residuos industriales, los incumplimientos en los tiempos de

entrega hacia el cliente, entre otros. Dado lo anterior, para solucionar estos problemas es necesario diagnosticar, evaluar e implementar mecanismos de gestión logística que ayuden a incrementar el nivel competitivo de las empresas dentro del sector.

1.3. Justificación

El diseño de planes de mejoramiento para los procesos que hacen parte de la actividad comercial de un negocio u organización, es un aspecto de gran importancia, debido a la relación directa de estos con el desarrollo y continuo crecimiento de las organizaciones en la actualidad. La administración de inventarios ha cobrado gran importancia desde en los últimos años, la cual se le ha visto como un proceso más de la empresa de la que se pueden obtener ventajas competitivas y por lo tanto mayores ingresos si se maneja eficazmente. La influencia que tiene el manejo de la gestión logística sobre la satisfacción del cliente, la prestación de un servicio de calidad y en algunos aspectos importantes para la empresa como: mano de obra, gestión de compras y pedidos, administración del inventario, gestión del almacén, distribución de los productos y servicio postventa, hacen de esta una temática importante relacionada en las líneas de investigación de la Carrera de Ingeniería Industrial y plasmada en el plan académico de la misma dentro del área de logística. Con el análisis de la gestión de inventarios se da la oportunidad para analizar cada una de las actividades que se realizan en la empresa, facilitando de esta forma la resolución de aquellos factores u operaciones que causan dificultad en el proceso. Este proyecto se enfoca hacia la necesidad de establecer y analizar los tipos de modelos relevantes para una adecuada planeación y control de los inventarios, lo que permitirá que las estrategias y planes propuestos mejoren la productividad y competitividad, que puede ser replicado en diversas Pymes de la ciudad de Cartagena de Indias.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Analizar diferentes tipos de modelamientos en ambientes determinísticos y estocásticos en busca de la mejora en la competitividad y productividad de Pyme del sector de manufactura de la ciudad de Cartagena, que permita una adecuada y eficiente gestión en el manejo de los inventarios de materiales directos para la fabricación.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Revisar la literatura en materia de los distintos modelos de inventarios determinísticos y estocásticos en los sistemas de producción.
- Desarrollar un diagnóstico en materia de inventarios, para una adecuada orientación del contexto de cómo se encuentra en la actualidad los almacenamientos y manejos de productos en Pyme del sector manufacturero de la ciudad de Cartagena.
- Construir diferentes tipos de modelos según el tipo de ambiente que permita el cálculo de indicadores asociados a costos, tiempo, y cantidad.
- Analizar los resultados obtenidos con el fin de idear planes o estrategias de mejora en Pyme del sector manufacturero de la ciudad de Cartagena

1.5. Aspectos Teóricos

Estado del Arte / Antecedentes

Las empresas de tipo manufactureras se caracterizan por la producción de bienes tangibles, por lo que generalmente, tienen inventarios, la administración adecuada o no de estos pueden llevarlas al éxito o al fracaso (Longenecker et al., 2010). Estos inventarios se van a estar presentando en las entradas productos de las materias primas, durante el proceso en forma de productos semielaborados y en las salidas representados como productos terminados.

Planear y controlar los inventarios es uno de los contextos más complejos dentro de la gestión de la cadena de suministros. Las altas inversiones que por parte de los administradores, gerentes y responsables de la gestión de la cadena, deben asumir por un capital asociado a las materias primas, los inventarios en proceso y los productos finales, constituyen una potencialidad para lograr mejoramientos en el sistema (Axsäter, 2000). Es muy común encontrar hoy en día empresas que aunque lleven a cabo una planificación y control de los inventarios regularmente caen en riesgo de excesos o escasez, debido a cambios inesperados en variables como la demanda o tiempos de entrega de productos hacia el cliente. Llevándolos a tomar decisiones sobre la cantidad de producto que se debe pedir, el nivel de inventario que se debe mantener y la capacidad de almacenamiento requerida, con base en supuestos y experiencias pasadas. Trayendo como consecuencias una afectación en el nivel de servicio de la compañía, el capital de trabajo y el almacenamiento disponible.

De acuerdo con Osorio (2013), los inventarios también surgen del desfase que existe entre la demanda de los consumidores y la producción o suministro de dichos productos. Sin embargo, se pueden atenuar estas causas mediante las siguientes estrategias: (i) La obtención de información precisa y en tiempo real sobre la demanda en el punto de consumo. A mayor información disponible oportunamente, la planeación será mucho más fácil y eficaz. (ii) La consolidación de centros de distribución y bodegas para aumentar los volúmenes de demanda por instalación, ya que más altos volúmenes de demanda conducen generalmente a menores niveles de variabilidad de la misma. (iii) La estandarización de productos para evitar el mantenimiento de inventarios de una gran diversidad de ítems que sólo difieren en aspectos menores de forma, color, condición, etc. Las características finales del producto pueden ser implementadas en el momento de recibir las órdenes de los clientes. (iv) El mejoramiento de los sistemas de pronósticos de demanda a través de técnicas estadísticas ampliamente reconocidas. (v) El mejoramiento de alianzas y de sistemas de comunicación con proveedores

y clientes para la reducción de tiempos de entrega, (vi) La emisión de órdenes conjuntas para diversos grupos de ítems con el objeto de balancear su inventario y la consolidación de despachos desde o hacia las localidades, utilizando instalaciones como el cross-docking y (vii) La reducción de demoras a lo largo de toda la cadena de abastecimiento, incluyendo los tiempos de tránsito en los sistemas de transporte.

En este caso y debido a que la planeación y el control de los inventarios se ha convertido en actividades trascendentales, que determinan el éxito o fracaso de objetivos importantes, se genera el área de oportunidad, dado que los mercados son cada vez más exigentes con relación a procesos de alta calidad y buenos niveles de servicio, exigiendo a las empresas afrontar mejores estándares de calidad, tecnologías y competitividad. Un aporte en este sentido lo proporciona la existencia de métodos para la planificación y control de las existencias dentro de la logística interna de una empresa (Valencia et al., 2015). En concordancia a esto, la optimización y simulación de inventarios ha tomado gran importancia durante los últimos años, dadas las tendencias del comportamiento del mercado, las ventas y la competitividad (Jianfeng et al., 2011).

Un modelo de optimización, tiene tres componentes básicos: las variables de decisión que se trata de determinar, el objetivo que se trata de optimizar y las restricciones que se deben satisfacer (Mathur & Solow, 1996). Así mismo al hacer una revisión de la temática se encontró que Tsai et al. (2007) determinaron un algoritmo para optimizar producción que sirvió de herramienta práctica para la programación de los pedidos. Consecuente a esto, Ortiz y Caicedo (2012), diseñaron un plan óptimo de producción en una planta embotelladora, buscando como objetivo las cantidades óptimas de pedido a un menor costo, contemporáneamente Caicedo y Ortiz (2014) diseñan un modelo matemático de optimización para mezcla de producción en una empresa de calzado, cuyo era objetivo era la de determinar las cantidades óptimas y el orden de los pedidos. Más recientemente Gámez et al. (2017) diseñan un modelo de

optimización de programación entera mixta en múltiples períodos, de manera que se puedan minimizar los costos de la red logística, considerando inventarios faltantes.

Por otra parte, un estudio de simulación permite conducir a un mejor entendimiento del sistema y por consiguiente sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia, a su vez anticiparse a las restricciones o cuellos de botellas o algún otro problema que pueda ser limitante del proceso (Naylor & Kong, 1980). Al hacer una revisión de la temática, se encontró que Ruiz et al. (2017) desarrollaron un sistema de inventarios basado en el modelo Montecarlo que permite controlar y manejar de una manera óptima la cantidad de producto y almacenamiento en la compañía, disminuyendo perdida y mejorando tiempos de respuesta. Contemporáneamente Escobar et al. (2017) diseñaron un modelo para encontrar la política de inventario con stock de seguridad para un modelo probabilístico que maximice la utilidad diaria esperada, considerando que los productos son perecederos y, por lo tanto, solo pueden estar almacenados por un máximo número de días, y proponen una metodología basada en Simulación Montecarlo. Más recientemente Serna y Rivera (2018) realizan un estudio de gestión de inventarios por medio de la simulación con dinámica de sistemas, donde es posible conocer el comportamiento de las variables de acuerdo a las decisiones que se tomen.

Actualmente en Colombia las pequeñas y medianas empresas cuando planifican y controlan sus inventarios, raramente contienen técnicas o herramientas que apoyen y soporten dicho proceso y que a su vez faciliten a los administrativos la toma de decisiones. De acuerdo con estudios realizados sobre la gestión de inventarios (Gutiérrez & Rodríguez, 2008; Gutiérrez & Jaramillo, 2009) muestran que los costos de los inventarios en las empresas colombianas pueden representar cerca del 20% de las ventas de una compañía. Estos estudios también han identificado que cerca de un 65 % de las empresas no cuenta con sistemas de soporte, herramientas o metodologías para la toma de decisiones dentro de la gestión de los inventarios, principalmente por tres grandes razones: (i) por los altos costos que este tipo de

herramientas o técnicas tienen, (ii) por la falta del conocimiento en lo relacionado con la información de entrada requerida, las variables involucradas en el proceso y los elementos necesarios para un adecuado desarrollo y (iii) por la falta de personal adecuadamente capacitado en la planeación y control de inventario, ya que de acuerdo con los estudios realizados, esta labor es encargada a personal administrativo de bajo rango, con capacitación casi nula en este tema. Por consiguiente para el desarrollo de esta investigación se brindan instancias habilitadoras para poder llevar a cabo como objetivo el análisis de modelamientos para la planeación y control de inventarios en ambientes determinísticos y estocásticos, en una empresa Pyme caso de estudio de la ciudad de Cartagena – Colombia, que sirvan de apoyo para la toma de decisiones y beneficio para la rentabilidad de la empresa.

Marco Conceptual

- Fabricación: "Una serie de actividades y operaciones interrelacionadas que involucran diseño, material y Selección, planificación, producción, control de calidad, gestión y comercialización del producto de las industrias manufactureras "(en esta definición, el sistema de fabricación es superior al sistema de producción) (Nahmias, 2007).
- Método: Un método de investigación proporciona un diseño específico para la investigación. El método se basa en la teoría que demuestra su valor y uso (Nahmias, 2007).
- Metodología: "Un conjunto de principios de métodos, que en cualquier situación particular deben reducirse a un método especialmente adecuado para esa situación particular" (Nahmias, 2007).
- Producción: Es "el acto o proceso (o actos conectados de procesos) de físicamente haciendo un producto de sus componentes materiales, a diferencia del diseño del producto, la planificación y el control de su producción, asegurando su calidad "(en

esta definición, el sistema de fabricación es superior al sistema de producción (Nahmias, 2007).

1.6. Metodología

Se considera la metodología como un procedimiento general para lograr de una manera precisa los objetivos de la investigación (Ver tabla 2). De lo anterior se deduce que la metodología de la investigación presenta los métodos y técnicas para realizar la investigación. A través de la metodología, se garantiza que los resultados obtenidos tengan el grado máximo de exactitud y confiabilidad (Bernal, 2026).

Tabla 2

Metodología para el logro de los objetivos

Etapas	Actividades	Intervención
Primera Etapa Desarrollo de una revisión de la literatura	[A1] Investigar y clasificar la información necesaria que sirva de soporte para conceptualizar los términos. [A2] Revisar de bases de datos, artículos científicos y desarrollar un estudio cienciométrico y bibliométrico.	SI
Segunda Etapa Diagnóstico en materia de inventarios	[A3] Identificación del proceso de producción e inventarios de la Pyme prioritaria del sector manufacturero de la ciudad de Cartagena. [A4] Visita de campo de trabajo para identificación de las variables y parámetros en Pyme prioritaria del sector manufacturero de la ciudad de Cartagena.	SI
Tercera Etapa Construcción de modelos matemáticos	[A5] Diseñar modelos cuantitativos basados en ambientes determinísticos y estocásticos.	SI
Cuarta Etapa Análisis de resultados	[A6] Realizar análisis de resultados y proponer mejoras.	SI

Tipo de investigación

Las investigaciones y estudios se desarrollan para impartir o adquirir conocimientos, motivo por el cual la selección del método es de suma importancia para así conocer la realidad. En relación a esto el presente trabajo aplicará varios tipos de investigación.

- Descriptiva: por lo que se busca poner en conocimiento todo lo relacionado en cuanto a características de la empresa seleccionada como caso práctico de estudio.
- Cuantitativa: debido a los datos que serán procesados y analizados principalmente en la etapa de análisis de datos de entrada y de salida.
- Propositiva: dado que la investigación permitirá el desarrollo de la propuesta para el modelamiento metodológico y cuantitativo con visión de ser convertida en una herramienta de aplicación para la toma de decisiones en las organizaciones.

Técnicas de recolección de la información

Las técnicas que se llevarán a cabo consistirán en la observación, entrevistas no estructuradas y encuestas. Que permitirán recoger datos a fin de complementar la investigación, los instrumentos utilizados en esta investigación consistirán en una libreta de notas para la ejecución de las entrevistas y plantillas estructuradas para las encuestas.

Población y muestra

Para el desarrollo de la presente investigación, de toda la población de Pymes empresas de la ciudad de Cartagena, se tomará de muestra una empresa caso de estudio del sector manufacturero prioritario y mediante la utilización de encuestas establecer las variables y parámetros necesarias para la construcción del modelo.

1.7. Competencias Investigativas

Luego del primer semestre de trabajo continuo en el semillero de investigación y durante la ejecución del proyecto se fortalecieron diversas competencias investigativas fundamentales para el ejercicio académico y profesional en el campo de la ingeniería industrial específicamente en la línea de producción y logística. A continuación, se describen las principales habilidades desarrolladas:

1. Búsqueda, clasificación y análisis de información científica: Se consolidó la capacidad para localizar, seleccionar y organizar información relevante proveniente de fuentes confiables, especialmente literatura científica y técnica. Esta competencia permitió construir marcos teóricos sólidos y actualizar conocimientos sobre los temas abordados.

2. Revisión bibliográfica crítica y análisis de producción científica: Se adquirieron habilidades para explorar bases de datos académicas, identificar tendencias de investigación, analizar la productividad científica de autores e instituciones, y establecer el estado del arte en torno al problema investigado, a través de herramientas bibliométricas y cienciometrías.

3. Reconocimiento y comprensión de procesos productivos reales: Se fortaleció la capacidad de comprender cómo funcionan los procesos de producción e inventario en empresas del sector manufacturero. Esto implicó una lectura crítica de contextos reales, diagnóstico de problemas operativos y análisis de las condiciones bajo las cuales se desarrollan las actividades empresariales.

4. Observación técnica y recolección de información en campo: Se desarrolló la competencia para realizar visitas técnicas con un enfoque investigativo, identificar

variables relevantes en los procesos observados, y registrar información clave de forma sistemática, rigurosa y ética.

5. Diseño y aplicación de modelos cuantitativos: Se adquirieron habilidades para estructurar y aplicar modelos matemáticos y estadísticos orientados a la solución de problemas logísticos. Esto incluyó el uso de modelos determinísticos y estocásticos, así como herramientas de simulación para analizar y predecir comportamientos en distintos escenarios.

6. Interpretación de resultados y formulación de propuestas de mejora: Se fortaleció la capacidad de interpretar datos obtenidos a través de los modelos aplicados, identificar patrones, validar resultados y proponer alternativas de mejora sostenibles y alineadas con las necesidades de la organización.

7. Redacción técnica y comunicación de resultados: Se mejoraron las competencias para estructurar informes técnicos, redactar resultados con claridad y coherencia, y comunicar los hallazgos de forma efectiva, tanto por escrito como de manera oral.

8. Trabajo colaborativo y ética en la investigación: Durante el proceso se afianzaron principios de responsabilidad, honestidad académica y trabajo en equipo. Se respetó la confidencialidad de la información y se promovió la cooperación entre los integrantes del equipo de investigación.

1.8. Productos resultados de investigación

Los estudiantes de pregrado participaron activamente en todos los objetivos específicos del proyecto de investigación, contribuyendo de manera integral al desarrollo y cumplimiento de cada uno de ellos. Como resultado de este trabajo, se elaboró una ponencia que fue presentada inicialmente en el evento RedColsi Regional 2024, realizado los días 23 y

24 de mayo. Posteriormente, dicha ponencia fue seleccionada para el RedColsi Nacional 2024, llevado a cabo del 9 al 12 de octubre, cumpliendo con todos los objetivos planteados en la investigación. Gracias a la calidad del producto presentado y al esfuerzo colectivo, se logró la clasificación al evento internacional Expoceti 2025, consolidando así el aporte significativo del equipo de pregrado en los productos resultado de investigación.

Tabla 3

Eventos de ponencia académica y objetivos intervenidos en el proyecto

Evento	Producto	Objetivos específicos intervenidos	Fecha
RedColsi – Regional 2024	Ponencia	Objetivo específico 1, Objetivo específico 2, Objetivo específico 3, Objetivo específico 4.	23 y 24 de mayo de 2024
RedColsi – Nacional 2024	Ponencia		Del 9 al 12 de octubre de 2024
Expoceti – Brasil 2025	Ponencia		Del 24 y 29 de junio de 2025

Figura 1

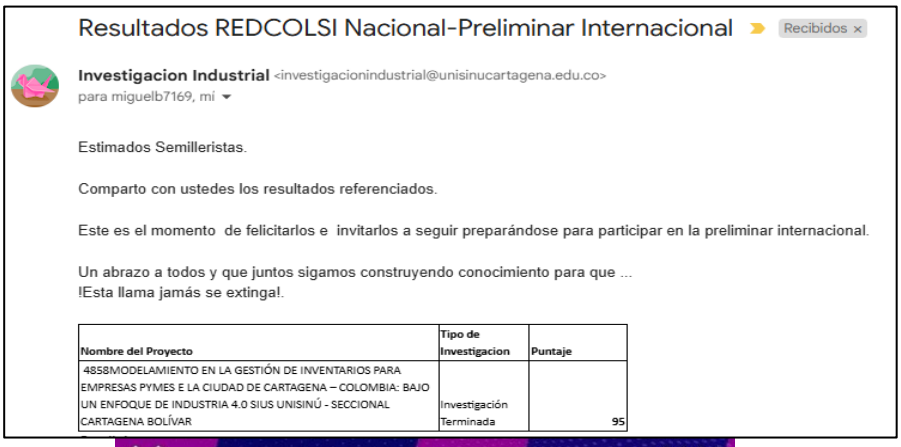
Participación de los autores en la exposición de póster durante el XX Encuentro Departamental de Semilleros de Investigación – RedCOLSI Nodo Bolívar

Figura 2

Participación de los autores en el XXVII Encuentro Nacional y XXI Internacional de Semilleros de Investigación – RedCOLSI, realizado en Barranquilla

Figura 3

Confirmación oficial de clasificación a la fase internacional de RedCOLSI



Resultados REDCOLSI Nacional-Preliminar Internacional — Recibidos ×

Investigacion Industrial <investigacionindustrial@unisinucartagena.edu.co>
para miguelb7169, mi

Estimados Semilleristas.

Comparto con ustedes los resultados referenciados.

Este es el momento de felicitarlos e invitarlos a seguir preparándose para participar en la preliminar internacional.

Un abrazo a todos y que juntos sigamos construyendo conocimiento para que ...
!Esta llama jamás se extinga!.

Nombre del Proyecto	Tipo de Investigacion	Puntaje
4858MODELAMIENTO EN LA GESTIÓN DE INVENTARIOS PARA EMPRESAS PYMES E LA CIUDAD DE CARTAGENA – COLOMBIA: BAJO UN ENFOQUE DE INDUSTRIA 4.0 SIUS UNISINÚ - SECCIONAL CARTAGENA BOLÍVAR	Investigación Terminada	95

2. PROYECTO 2024

Desafío hacia la Industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas (Pymes) de la ciudad de Cartagena – Colombia: Bajo un enfoque de complejidad en sistemas de manufactura.

2.1. Resumen

El entorno empresarial es cada vez más complejo y competitivo por lo que las organizaciones deben buscar mecanismos que les permitan desarrollar nuevas estrategias, nuevos mecanismos de medición y competir con éxito. A menudo los estudios sobre la complejidad están siendo cada vez más frecuentes y fundamentales para las organizaciones modernas, debido a que quienes las administran tratan de gestionarla, reducirla o eliminarla en sus procesos, por lo que reducen costos, aumentan ingresos y mejoran la competitividad en los mercados internos y externos. En un sistema productivo, la complejidad siempre está presente, desde que entran las materias primas hasta que sale el producto terminado, inclusive, en la medida que las empresas tengan que ampliar su capacidad por la volatilidad de la demanda, las operaciones tienden a ser cada vez más complejas. Este proyecto de investigación tiene como objetivo, desarrollar mecanismos que permitan la gestión de la complejidad en sistemas de manufactura, considerando las diferentes tecnologías que hacen parte de la industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas (Pymes) de la ciudad de Cartagena – Colombia. La investigación se fundamenta inicialmente en una revisión de la literatura, la cual permitirá estudiar la complejidad y su relación con la industria 4.0 en sistemas de manufactura de manera amplia y concreta; consecuente a esto se desarrolla un instrumento de recolección de datos, que permita la obtención de información pertinente, tomando como muestra diversas Pymes del sector, permitiendo diagnosticar el estado actual del sistema. Por consiguiente se diseña un modelo estructurado que conlleve a la identificación y medición de la complejidad, sirviendo de parámetro para focalizar procesos de mejora, que permitan una

adecuada gestión a partir de la intervención de las tecnologías de la Industria 4.0; La puesta en marcha de este proyecto investigación en este campo de la ingeniería industrial, brindará un impacto en el sistema productivo zonal de Cartagena - Colombia, aportando soluciones a diferentes tipos de problemas de decisión focalizados en la complejidad y en el contexto de la Industria 4.0, que apuntan a que las empresas desarrollen estrategias de innovación, impactando en su eficiencia y productividad.

2.2. Planteamiento del problema

Las principales economías de Latinoamérica para el año de 2019 evidenciaron avances menores respecto al año anterior, sin embargo, cabe resaltar el crecimiento productivo encabezado por Colombia con un 2.20%, siendo jalonado por actividades como: fabricación de muebles, elaboración de productos de tabaco; elaboración de bebidas; elaboración de productos alimenticios, fabricación de productos de madera, fabricación de productos de refinación de petróleo y fabricación de productos metalúrgicos. En segunda instancia se encuentra Chile, con una cifra de 2.13% y luego Perú con 1.58%. México que sólo avanzó 1.27%, Brasil, con 0.79% y Argentina que ejecuta un programa antiinflacionario que retrocedió 5.71%1. Sin embargo, es notorio el crecimiento post pandemia que están generando las pequeñas y medianas empresas (Pyme) del sector Industrial, y esto se debe a la alta variedad de productos y al aporte que brindan a las grandes compañías.

Es por esto que los gerentes y directivos deben enfrentarse a altos desafíos, no solamente en aspectos organizacionales, administrativos y tecnológicos, sino también a ser más competitivos y estratégicos a los continuos cambios, que se presentan en el entorno, que permitan mantenerse en el mercado y competir con éxito. Por esto, es importante comprender el sistema productivo, dado que el desconocimiento o desinformación, trae consigo el

desarrollo de procesos complejos, emergiendo diferentes comportamientos que hacen que el decisor pueda entrar en una perplejidad en la toma de decisiones.

Los sistemas productivos requieren recursos vitales para llevar a cabo la ingeniería fabril, entre estos se encuentra: (i) cantidad de materia prima, piezas, partes, componentes o subensambles; (ii) cantidad de trabajadores y supervisores; (iii) cantidad de máquinas, equipos y herramientas; (iv) cantidad de recursos energéticos; (v) cantidad de información, entre otros. Adicional a esto también intervienen factores asociados (i) con los materiales cuando no cumplen especificaciones de tiempo, cantidad y calidad; (ii) con la mano de obra cuando se presentan cambios de ritmo de trabajo, ausentismo y accidentes y (iii) con las máquinas cuando fallan, y se presentan ausencias de repuestos y herramientas. Esta interacción entre elementos y factores hacen que los sistemas sean inestables y más complejos.

A menudo los estudios sobre la complejidad están siendo cada vez más frecuentes y fundamentales para las organizaciones modernas, debido a que quienes las administran tratan de gestionarla, reducirla o eliminarla en sus procesos, por lo que reducen costos , aumentan ingresos y mejoran la competitividad en los mercados internos y externos. En un sistema productivo, la complejidad siempre está presente, desde que entran las materias primas hasta que sale el producto terminado, inclusive, en la medida que las empresas tengan que ampliar su capacidad por la volatilidad de la demanda, las operaciones tienden a ser cada vez más complejas. Es por esto, que nace la motivación en abordar esta investigación, de manera que permita lograr entender la complejidad en los sistemas de manufactura, enmarcando en un ambiente de Industria 4.0; por tanto, se plantea el objetivo de desarrollar mecanismos que permitan la gestión de la complejidad en sistemas de manufactura, considerando las diferentes tecnologías que hacen parte de la industria 4.0 en pequeñas y medianas empresas (Pymes) de la ciudad de Cartagena – Colombia. Enmarcado metodológicamente en cuatro

etapas como (i) Revisión de la literatura, (ii) Desarrollo y aplicación del instrumento de recolección de datos, (iii) Diseño de un modelo estructurado y (iv) aplicación y validación del modelo.

2.3. Justificación

La gestión efectiva de la complejidad en sistemas de manufactura se vuelve crucial para las Pymes en el contexto de la Industria 4.0. Las Pymes, al contar con recursos limitados, enfrentan desafíos específicos al adoptar tecnologías avanzadas. Esta investigación desde una justificación práctica busca proporcionar soluciones concretas y estrategias adaptadas a la realidad operativa y financiera de las Pymes. Al comprender y abordar los desafíos prácticos, facilitando la implementación exitosa de tecnologías 4.0, mejorando la eficiencia y competitividad de estas empresas en entornos de manufactura complejos. De igual forma presenta una importancia desde una perspectiva teórica, dado que contribuirá al cuerpo de conocimientos en gestión de la complejidad y tecnologías de la Industria 4.0 en el ámbito de las Pymes, permitiendo comprender mejor los fundamentos teóricos y reduciendo la brecha entre la teoría y la práctica. Desde un enfoque social brindará desarrollo exitoso al sector industrial, contribuyendo al crecimiento económico y al bienestar social, fomentando la innovación y la sostenibilidad, generando impactos positivos en la comunidad empresarial y la sociedad en general. Cabe resaltar que el proyecto de investigación se alinea estrechamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, contribuyendo de manera significativa a la promoción de un desarrollo económico, social y ambientalmente sostenible en Cartagena y más ampliamente en Colombia. Entre estos se destacan:

- ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico: La gestión eficiente de la complejidad en sistemas de manufactura, especialmente en Pymes, tiene el potencial

de estimular el crecimiento económico sostenible y la creación de empleo decente. Al mejorar la competitividad de estas empresas mediante la adopción de tecnologías 4.0, se promueve un entorno empresarial robusto y sostenible, contribuyendo así al ODS 8.

- ODS 9: Industria, innovación e infraestructura: La investigación se centra en la gestión de la complejidad en el contexto de la Industria 4.0, directamente vinculada al ODS 9. Al identificar barreras y proporcionar estrategias para la adopción de tecnologías avanzadas en Pymes, la investigación contribuye a fortalecer la base industrial, fomentando la innovación y mejorando la infraestructura tecnológica.

  Más específicamente con los siguientes aspectos:

- Política Nacional de ciencia, tecnología e Innovación: Biotecnología, Bioeconomía y Medio Ambiente, industrias creativas y culturales, Tecnologías convergentes e industrias 4.0, ciencias sociales, desarrollo Humano y equidad, Ciencias básicas y del espacio, Océanos y recursos hídricos, Energía Sostenible, Ciencias de la Vida y la salud.

- Agenda integrada de competitividad, ciencia, tecnología e innovación del departamento (petroquímico plástico, agroindustrial, turismo, logística para el comercio, astilleros, construcción, industria creativa y cultural, offshore, energías renovables y minería).

- Líneas de investigación declaradas por cada uno de los grupos de investigación con aval institucional, otorgado por la seccional Cartagena.

- Productividad, competitividad, crecimiento y desarrollo económico.

Desde un ámbito académico, otro tipo de justificación se ve reflejada en la solución de problemáticas propias en empresas de diferentes sectores de manufactura. Por medio de la aplicación de la metodología ABP, con la participación de estudiantes de pregrado con rol de semilleristas. Donde el objetivo principal es poner en práctica lo aprendido durante la carrera profesional de ingeniería industrial, y más específicamente en las asignaturas que hacen parte de la línea de investigación logística y de producción. Lo anterior, se verá reflejado en productos visibles de investigación, como ponencia en evento científico con registro de ISBN en resúmenes del evento.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo General

Diseñar un modelo estructural que permita gestionar la complejidad en sistemas de manufactura, mediante el uso de tecnologías de industria 4.0 en Pymes de la ciudad de Cartagena - Colombia, que facilite el proceso de gerenciamiento y asertividad en la toma de decisiones.

2.4.2. Objetivos Específicos

Este trabajo investigativo busca poder determinar la manera adecuada gestionar la complejidad en sistemas de manufactura considerando las distintas tecnologías existentes de la industria 4.0 de tal manera que las empresas puedan adoptar mecanismos en beneficio de una mayor productividad, eficiencia y competitividad. Para el avance de este objetivo general se tuvieron en cuenta los siguientes objetivos específicos:

- Recolectar información a través de una revisión de la literatura sobre los ejes temáticos de la complejidad en sistemas de manufactura y el ambiente de la industria 4.0.

- Identificar por medio de un estudio las tecnologías de la Industria 4.0 que impacten en la reducción de la complejidad dentro de los procesos de fabricación en el zonal manufacturero de Cartagena – Colombia.
- Diseñar un modelo estructural que contribuya a la incorporación de tecnologías de la industria 4.0 en Pymes de la ciudad de Cartagena – Colombia y apoye a los tomadores de decisiones dentro del ámbito empresarial.
- Validar el impacto del modelo, permitiendo una evaluación y entendimiento actual del sistema, en casos de estudios del sector de manufactura de pequeñas y medianas empresas de la ciudad de Cartagena – Colombia.

2.5. Aspectos Teóricos

Estado del Arte / Antecedentes

Haciendo una revisión de la literatura, una de las primeras definiciones sobre complejidad aparece en los trabajos desarrollados por Ashby (1963) con la llamada ley de variedad de requisitos, donde establece que solo complejidad absorbe complejidad. Esta ley sugiere que a mayor complejidad, mayor control el sistema, es decir, el esfuerzo de la complejidad del observador debe ser superior frente a ese dominio de acción. Consecuente a esto una de las primeras definiciones sobre complejidad fue aportada por Simon (1991) quien define complejidad estipulando que un sistema es complejo cuando posee una alta variedad de elementos, que al relacionarse unas con otras, no se hace tan sencillamente. Demostrando como un sistema sencillo aquel que tiene limitaciones en los parámetros, a diferencia del sistema complejo que es más heterogéneo (de Rosnay, 1977). Contemporáneamente sobresalieron los estudios sobre la teoría de la complejidad proveniente de las investigaciones sobre el fenómeno termodinámico a sistemas alejados del equilibrio desarrollados por Prigogine Ilya, físico químico ruso, quien fue galardonado por la Real Academia Sueca de

Ciencias con el premio Nobel de Química en el año de 1977. De estos estudios sobresalen los asociados con los sistemas complejos. Para Yates (1978) un sistema es complejo cuando interactúan distintos elementos como: (i) Interacciones significativas, el cual hace alusión a la dependencia entre los elementos que conforman el sistema. (ii) El tamaño del sistema, que está asociado a la cantidad de dependencias que la conforman. (iii) Al comportamiento no determinístico de los sistemas. (iv) Asimetría, que dificulta su entendimiento. (v) Restricciones no holónicas, que implica una restricción para el control y predicción del sistema.

Uno de los autores que sobresale es Klir (1985) quien establece que "la complejidad del sistema debe ser proporcional a la cantidad de información requerida para describir el sistema". En su investigación determinó que un sistema se hace complejo cuando existe una gran cantidad de entidades que entran y salen del sistema, y cuando existe un alto número de locaciones donde estas deben interrelacionarse. A medida que aumenta la comunidad, la variedad disminuye y la complejidad disminuye. En este sentido Ulrich y Probst (1988), proponen que la complejidad se entiende como una calidad del sistema donde el grado está sujeto de la cantidad de elementos que existan en el sistema, las relaciones que se desarrollen entre ellos y las diferentes condiciones en que se encuentre. Consecuente a esto, Stacey et al. (2000) y Gare (2000) proponen que la complejidad de un sistema depende de la heterogeneidad, diversidad y pluralidad de los distintos elementos que conformen el sistema. En un contexto más amplio, la complejidad también depende de su variabilidad temporal, debido a efectos específicos de la industria y de las empresas, la cual conducen principalmente a la ineficiencia y al aumento de los costos (Schuh, 2014). Los autores Garbie y Shikdar (2011) afirman que la complejidad ha empezado a considerarse como una nueva forma de evaluación de las empresas industriales, siendo además una de las herramientas útiles para el análisis de mejoras y la reestructuración empresarial. Desde un escenario

manufacturero empiezan aparecer distintos tipos de conceptos asociados con el producto o con los factores de producción, de acuerdo con Schuh (2013) la complejidad depende de la variedad un producto o de factores dentro de la producción, dependiendo de la cantidad de partes involucradas o tipos de procesos y su variabilidad a lo largo del tiempo.

En los últimos años, los científicos se han preocupado por estudios de este tipo de temática, tal como se evidenció en los análisis cienciométricos y bibliométricos, donde el interés por las redes complejas se hace notorios, donde se establecen que los sistemas complejos están compuestos por una serie de componentes que interactúan en el desarrollo de la manufactura (Singh et al., 2012; Sinha & de Weck, 2016; Tamaskar et al., 2014). Pero las empresas no están aisladas participan de estructuras y aparece también el concepto la complejidad en las redes empresariales, donde emergen comportamientos no esperados cuando nodos de una red participan en otras redes. Estos comportamientos traen consigo una relación entre la gran cantidad de nodos e información que fluye entre ellos, haciendo que los sistemas sean cada vez más complejos. De acuerdo con Chryssolouris et al. (2013), la complejidad en las redes está aumentando cada vez más porque se tienen que afrontar una serie de estrategias anidadas con el entorno, dado lo anterior entre mayor sea el número de agentes que participan e interactúan, mayor es la complejidad de la red (Byrne & Callaghan, 2013).

En un contexto nacional, no es ajeno en los sectores productivos, la alta competitividad de los mercados, los efectos de la globalización, la economía acelerada y los avances de tipo tecnológicos. Por tanto las empresas, deben buscar mecanismos que les permitan una mayor flexibilidad, agilidad, facilidad y menos complejidad. Es por esto, que el nuevo desafío de las compañías está orientado hacia la implementación de estrategias que permitan alcanzar un crecimiento inteligente, en lo que se conoce como la Industria 4.0, de acuerdo con Castellanos y Escott (2020), esto se logra adaptando tecnologías, manufactura

flexible, transformación digital y desarrollo de software, que permitan la automatización en la interacción de los elementos del sistema.

Lo anterior, son escenarios habilitadores para el desarrollo de la presente investigación, que propone un modelo que permita reducir la brecha y lograr un acercamiento entre los nuevos desafíos de la Industria 4.0 con los diferentes sectores manufactureros de Pymes de la ciudad de Cartagena – Colombia, con el fin de fortalecer sus procesos productivos y gestionar de manera eficiente indicadores modernos como la complejidad.

Marco Conceptual

- Sistema: Un sistema se define como un conjunto de ítems que están dinámicamente relacionados (Stafford Beer, 1969).
- Manufactura: La manufactura es el proceso de agregar valor a un material para construir un producto (Quirk, 1999).
- Producción: Es "el acto o proceso (o actos conectados de procesos) de físicamente haciendo un producto de sus componentes materiales, a diferencia del diseño del producto, la planificación y el control de su producción, asegurando su calidad" (Stafford Beer, 1969).
- Complejidad: La complejidad es cuando un sistema posee una alta variedad de elementos, que al relacionarse unas con otras, no se hace tan sencillamente (Simon, 1991).
- Industria 4.0: Es un término que fue utilizado por primera vez por el Gobierno alemán y que describe una organización de los procesos de producción basada en la tecnología y en dispositivos que se comunican entre ellos de forma autónoma a lo largo de la cadena de valor. Este fenómeno representa un cambio tan grande que también se denomina como la cuarta revolución industrial (Smit et al., 2016).

2.6. Metodología

Se considera la metodología como un procedimiento general para lograr de una manera precisa los objetivos de la investigación (Ver tabla 1). De lo anterior se deduce que la metodología de la investigación presenta los métodos y técnicas para realizar la investigación. A través de la metodología, se garantiza que los resultados obtenidos tengan el grado máximo de exactitud y confiabilidad (Bernal, 2006).

Tabla 4

Metodología para el logro de los objetivos

Etapas	Actividades	Intervención
Primera Etapa Desarrollo de una revisión de la literatura	[A1] Investigar y clasificar la información necesaria que sirva de soporte para conceptualizar los términos. [A2] Revisar de bases de datos, artículos científicos y desarrollar un estudio cienciométrico y bibliométrico.	SI
Segunda Etapa Diagnóstico sectorial	[A3] Identificación del proceso de producción e inventarios de la Pyme prioritaria del sector manufacturero de la ciudad de Cartagena. [A4] Visita de campo de trabajo para identificación de las variables y parámetros en Pyme prioritaria del sector manufacturero de la ciudad de Cartagena. [A5] Visita de campo de trabajo para identificación de las variables y parámetros en Pyme prioritaria del sector manufacturero de la ciudad de Cartagena.	SI
Tercera Etapa Diseño del modelo estructural	[A6] Diseño del modelo estructural. [A7] Análisis de resultados.	SI
Cuarta Etapa Validación del modelo	[A8] Validación del modelo y puesta en marcha del modelo en casos específicos.	SI

Tipo de investigación

- Las investigaciones y estudios se desarrollan para impartir o adquirir conocimientos, motivo por el cual la selección del método es de suma importancia para así conocer la realidad. En relación a esto el presente trabajo aplicará varios tipos de investigación.
- Descriptiva: por lo que se busca poner en conocimiento todo lo relacionado en cuanto a características de la empresa seleccionada como caso práctico de estudio.
- Cuantitativa: debido a los datos que serán procesados y analizados principalmente en la etapa de análisis de datos de entrada y de salida.
- Propositiva: dado que la investigación permitirá el desarrollo de la propuesta para el modelamiento metodológico y cuantitativo con visión de ser convertida en una herramienta de aplicación para la toma de decisiones en las organizaciones.

Población y muestra

Para el desarrollo de la presente investigación, de toda la población de Pymes empresas de la ciudad de Cartagena, se tomará de muestra una empresa caso de estudio del sector manufacturero prioritario y mediante la utilización de encuestas establecer las variables y parámetros necesarios para la construcción del modelo.

Técnicas de recolección de la información

Las técnicas que se llevarán a cabo consistirán en la observación, entrevistas no estructuradas y encuestas. Que permitirán recoger datos a fin de complementar la investigación, los instrumentos utilizados en esta investigación consistirán en una libreta de notas para la ejecución de las entrevistas y plantillas estructuradas para las encuestas.

2.7. Competencias investigativas

Durante el segundo año de formación en el semillero de investigación, participando activamente en un proyecto orientado al diseño, validación y aplicación de un modelo estructural en el sector manufacturero, logramos adquirir y fortalecer competencias investigativas fundamentales. A través de actividades progresivas que incluyeron revisión bibliográfica, diagnóstico sectorial, construcción metodológica y validación práctica, desarrollamos habilidades analíticas, metodológicas y éticas que nos permiten abordar con mayor solidez procesos de investigación aplicada en contextos reales de la industria.

1. Exploración conceptual y análisis documental: Adquirimos habilidades para investigar y clasificar información relevante que sirviera de sustento teórico al proyecto. Aprendimos a estructurar revisiones bibliográficas rigurosas, empleando fuentes científicas, artículos especializados y técnicas de análisis bibliométrico, lo que nos permitió comprender a profundidad los fundamentos del problema abordado.

2. Comprensión del entorno sectorial: Fortalecimos nuestra capacidad de análisis del contexto productivo al estudiar la dinámica del sector manufacturero de Cartagena. Desarrollamos competencias para interpretar datos económicos, identificar patrones en el comportamiento empresarial y reconocer variables clave del entorno industrial.

3. Diseño y aplicación de instrumentos de diagnóstico: Aprendimos a construir instrumentos de recolección de información válidos y pertinentes, como cuestionarios y listas de verificación. Esto implicó comprender principios metodológicos y adaptar herramientas según el perfil y las condiciones de las Pymes seleccionadas para el estudio.

4. Trabajo de campo y levantamiento de información primaria: Logramos ejecutar actividades de campo con enfoque técnico y ético, aplicando nuestros instrumentos

para identificar procesos, variables operativas y parámetros relevantes en contextos reales. Esto nos permitió fortalecer habilidades de observación directa y contacto con actores del sector.

5. Diseño y construcción de modelos de simulación: Se adquirió la capacidad para estructurar modelos de simulación que representan procesos reales bajo condiciones controladas, permitiendo analizar el comportamiento de sistemas complejos y prever escenarios futuros a partir de variables determinadas.

6. Aplicación de herramientas de simulación para la toma de decisiones: Se fortaleció la competencia para utilizar software especializado en simulación con el fin de evaluar el rendimiento de sistemas, identificar cuellos de botella y proponer mejoras operativas basadas en el análisis de los resultados obtenidos.

2.8. Productos resultados de investigación

Los estudiantes de pregrado participaron activamente en el desarrollo del segundo objetivo específico del proyecto de investigación, el cual estuvo orientado a identificar las tecnologías de la Industria 4.0 que impactan en la reducción de la complejidad en los procesos operativos. Como resultado de este trabajo, se logró la publicación de un artículo científico en una revista académica, evidenciando el cumplimiento del objetivo planteado y consolidando el aporte significativo del proceso investigativo al fortalecimiento de las capacidades analíticas y técnicas dentro del contexto de la industria 4.0.

Tabla 5

Publicación del artículo científico del proyecto P002 en la revista BILO y objetivos intervenidos

Proyecto	Revista	Producto	Objetivos específicos intervenidos	Fecha
P002	Boletín de Innovación, Logística y Operaciones (BILO)	Artículo	Objetivo específico 1, Objetivo específico 2, Objetivo específico 3	28 de noviembre de 2024

Figura 4

Portada del artículo publicado en el Boletín de Innovación, Logística y Operaciones

Boletín de Innovación, Logística y Operaciones

BILO Vol. 6 No. 2. Julio - Diciembre de 2024

Simulación del proceso de extracción y descargue de malezas en la ciénaga Juan Gómez del departamento de Bolívar-Colombia

Simulation of the extraction process and unloading of weeds in the Juan Gómez swamp department of Bolivar-Colombia

DOI: https://doi.org/10.17981/bilo.6.2.2024.15

Fecha de recepción: 14/11/2024. Fecha de Publicación: 28/11/2024

Kevin Puello-Martinez
Universidad del Sinú, Cartagena, Colombia
kevinepuello@unisinu.edu.co

Miguel Buelvas-Gallo
Universidad del Sinú, Cartagena, Colombia
miguelabuelvas@unisinu.edu.co

German Herrera-Vidal
Universidad del Sinú, Cartagena, Colombia
gherreravv@unisinucartagena.edu.co

Como citar en *IEEE* este artículo: Puello-Martinez, K. y Otros, «Simulación del proceso de extracción y descargue de malezas en la ciénaga Juan Gómez del departamento de Bolívar-Colombia» Boletín de Innovación, Logística y Operaciones, vol. 6. No. 2. pp. 124-133, 2024. Online. https://revistacientificacuc.edu.co/bilo/article/view/6116

Resumen

Esta investigación destaca la relevancia de la simulación de eventos discretos como una herramienta estratégica para evaluar procesos logísticos complejos, aplicada a un sistema real en la ciénaga Juan Gómez, Bolívar, Colombia. El objetivo es desarrollar un modelo de simulación para comparar la eficiencia operativa en los procesos de extracción, y descargue de malezas de cada una de las cuadrillas, permitiendo tomar decisiones basadas en datos durante la ejecución del proyecto. Bajo un enfoque cuantitativo y mediante una metodología basada en simulación, se modelaron las operaciones de tres cuadrillas asociadas a un recurso específico tipo botes mediante software ProModel. La investigación, es de tipo práctica, aplicada y propositiva. Los hallazgos identificaron ineficiencias en la cuadrilla 3, proponiéndose estrategias como la redistribución de tareas, optimización de procesos logísticos y mantenimiento preventivo para mejorar su desempeño. Este estudio evidencia el valor de la simulación como herramienta robusta para analizar y resolver problemáticas logísticas en

© The author; licensee Universidad de la Costa - CUC.
BILO Vol. 6. No. 2. pp. 124-133. Julio - Diciembre 2024
Barranquilla. ISSN 2711-3280
Creative Commons — CC BY-NC-ND 4.0

3. PROYECTO 2025

Complejidad en la Cadena de Suministros 4.0: Caso Agroindustria del Cacao en Bolívar – Colombia.

3.1. Resumen

La competitividad global y las exigencias de la economía actual impulsan a las industrias a adoptar estrategias innovadoras para mejorar su capacidad de respuesta y satisfacción del cliente. En la cadena de suministro del cacao, los diversos agentes (proveedores, fabricantes, distribuidores, minoristas y consumidores) mantienen flujos de información, materiales y dinero que, al entrelazarse, generan un sistema altamente complejo. Implementar un enfoque basado en la Industria 4.0 podría optimizar esta cadena en Bolívar, Colombia, aumentando su eficiencia y sostenibilidad. Este proyecto busca gestionar eficazmente la complejidad inherente de la cadena de suministro del cacao mediante la integración de tecnologías 4.0. La meta es diseñar un modelo que permita identificar y medir los factores de complejidad de la cadena en Bolívar, y con ello proponer mejoras específicas que faciliten una gestión más efectiva. El tipo de investigación es exploratoria y propositiva, enfocada en identificar factores clave y en diseñar modelos de mejora tecnológica para esta cadena de suministro. Metodológicamente, comienza con una revisión exhaustiva de literatura sobre complejidad en cadenas de suministro y su vínculo con la Industria 4.0. Luego, se realizará trabajo de campo en Bolívar, recopilando datos de los actores clave de la cadena de suministro del cacao. Basado en esta información, se desarrollarán modelos para medir y gestionar la complejidad, estableciendo pautas de mejora respaldadas en las tecnologías de la Industria 4.0. Como posibles hallazgos se prevé identificar limitaciones como la falta de habilidades digitales y de infraestructura, junto con beneficios potenciales de digitalización como mejor trazabilidad, reducción de costos y eficiencia en los flujos de

información y materiales. El proyecto busca ofrecer soluciones prácticas que fomenten la innovación, apoyando a las empresas locales para mejorar su eficiencia y productividad en un entorno de Industria 4.0.

3.2. Planteamiento del problema

En Colombia, el cacao es un cultivo de gran relevancia socioeconómica, con aproximadamente 52,000 familias dependiendo de esta actividad para su sustento. El cacao se produce en 431 municipios de 28 departamentos, con áreas sembradas que alcanzan las 188,370 hectáreas y una producción de 63,416 toneladas en 2020. A nivel internacional, Colombia ocupa el décimo lugar en producción de cacao, con un 95% de su producción catalogada como cacao fino y de aroma, exportado a más de 70 países, entre ellos México, Italia, Bélgica, y Estados Unidos. Sin embargo, la cadena agroindustrial del cacao enfrenta notables limitaciones. Estas incluyen una estructura de organización fragmentada, con agentes que operan de forma independiente y con objetivos individuales. Además, existen problemas de comunicación y baja articulación entre los actores, lo que limita la integración y dificulta la coordinación de planes y recursos. Otros aspectos críticos son la baja productividad y los bajos ingresos de los agricultores, acompañados de una falta de capacitación y de asistencia técnica efectiva. Estas brechas debilitan la cadena de valor y frenan el potencial competitivo de este sector en el mercado global.

La cadena de suministro del cacao en Colombia es altamente compleja debido a la gran cantidad de nodos y enlaces que integran esta red, los múltiples niveles involucrados (desde agricultores y cooperativas hasta distribuidores y exportadores), y la variabilidad de la demanda tanto nacional como internacional. Esta estructura, con múltiples niveles y nodos interconectados, requiere de una alta coordinación para manejar eficientemente el flujo de productos y de información entre los actores. Sin embargo, esta cadena enfrenta serios

desafíos, entre los que destaca la variabilidad en la demanda de cacao, impulsada por factores de consumo estacional y fluctuaciones en los mercados internacionales, lo cual añade incertidumbre y exige adaptaciones rápidas en cada eslabón. La coordinación también se ve obstaculizada por la falta de tecnologías avanzadas y sistemas de automatización que puedan mejorar la trazabilidad, sincronizar las operaciones y simplificar los numerosos enlaces de comunicación. Este conjunto de factores genera complejidad y aumenta el riesgo de retrasos y cuellos de botella, dificultando la eficiencia operativa y reduciendo la capacidad de respuesta del sector a las oportunidades globales de mercado.

A partir de este proyecto, se propone gestionar de manera efectiva la complejidad de la cadena de suministro del cacao mediante la integración de tecnologías de la Industria 4.0, como el Internet de las Cosas (IoT), blockchain y análisis de datos. El objetivo es diseñar un modelo que permita medir e identificar los factores de complejidad y optimizar la comunicación y coordinación entre los distintos agentes de la cadena. La implementación de estas tecnologías no solo contribuiría a mejorar la trazabilidad y transparencia de los procesos, sino que también facilitaría la toma de decisiones informada, reduciría los tiempos de respuesta ante variaciones de demanda y mejoraría la calidad del producto para satisfacer las exigencias del mercado internacional. Al enfocarse en estas soluciones innovadoras, el proyecto busca transformar la cadena de suministro del cacao en Bolívar en una red eficiente, competitiva y adaptable, fortaleciendo su posición en el mercado global y generando un impacto positivo en los ingresos y la calidad de vida de los productores locales.

3.3. Justificación

La investigación sobre la gestión de la complejidad en la cadena de suministro del cacao en Bolívar, Colombia, bajo el enfoque de Industria 4.0, resulta fundamental en varios niveles. Desde una perspectiva teórica, este estudio contribuirá al avance del conocimiento en

torno a la gestión de sistemas complejos en el sector agroindustrial, un área donde las cadenas de suministro presentan interacciones múltiples y factores de incertidumbre que complican la coordinación y el flujo de información. Al integrar tecnologías de la Industria 4.0 como IoT, blockchain y análisis de datos, se busca analizar y modelar cómo estas herramientas pueden gestionar la complejidad de la cadena de valor del cacao, superando desafíos asociados con la fragmentación de agentes, la variabilidad de la demanda y la falta de infraestructura tecnológica. Esto permitirá llenar un vacío en la literatura existente sobre la aplicabilidad de estas tecnologías en sectores agrícolas de economías en desarrollo, enriqueciendo así las teorías sobre la adaptabilidad de la Industria 4.0 a condiciones de alta complejidad.

En términos prácticos, la investigación ofrece soluciones concretas a problemáticas críticas dentro de la cadena de suministro del cacao en Bolívar. La alta complejidad de este sistema, caracterizada por múltiples niveles de agentes, contratos a corto plazo y baja integración entre actores, afecta la productividad y limita la competitividad. Al implementar tecnologías 4.0, se espera mejorar la coordinación y trazabilidad, optimizar los flujos de información y reducir los costos de transacción, logrando una gestión de la complejidad más efectiva. Estos avances ayudarán a los productores y a otros actores a responder mejor a los cambios del mercado, lo que se traducirá en mayores ingresos y oportunidades de crecimiento.

Desde una perspectiva social, este proyecto también tiene un impacto significativo en las comunidades agrícolas de Bolívar, donde la producción de cacao es una fuente crucial de empleo y sustento. La mejora en la gestión de la complejidad de la cadena de suministro no solo favorecerá la eficiencia económica, sino que también contribuirá a la estabilidad financiera de miles de familias. Una cadena de suministro más integrada y menos vulnerable permitirá condiciones laborales y productivas más seguras, impulsando el desarrollo económico local. En última instancia, el proyecto no solo aborda problemas técnicos, sino

que también busca contribuir al bienestar de las comunidades y al desarrollo sostenible de la región, potenciando una industria cacaotera competitiva y socialmente responsable.

Cabe resaltar que este proyecto de investigación se alinea estrechamente con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, contribuyendo de manera significativa a la promoción de un desarrollo económico, social y ambientalmente sostenible en el departamento de Bolívar y en Colombia en general.

- En relación con el ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico, el proyecto busca mejorar la cadena de suministro del cacao, promoviendo condiciones laborales dignas y aumentando la productividad y los ingresos de los agricultores. La modernización de la cadena, mediante la incorporación de tecnologías de la Industria 4.0, permitirá que los productores locales puedan acceder a mejores oportunidades económicas y reducir la dependencia de intermediarios, fomentando un crecimiento inclusivo y la estabilidad financiera de miles de familias que dependen del cultivo de cacao.

- Respecto al ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, el proyecto impulsa la adopción de infraestructura tecnológica avanzada y prácticas innovadoras en un sector agrícola tradicional. La aplicación de tecnologías como IoT, blockchain y análisis de datos tiene el potencial de transformar la cadena de suministro, mejorando la eficiencia, trazabilidad y sostenibilidad de la industria del cacao. Además, esta investigación contribuye a fortalecer la infraestructura digital y de comunicación en áreas rurales, promoviendo una industria cacaotera innovadora y competitiva que pueda responder a las demandas del mercado global.

Desde un ámbito académico, otro tipo de justificación se ve reflejada en la solución de problemáticas propias en la cadena de suministros agroindustrial del cacao en Bolívar- .

Por medio de la aplicación de la Metodología ABP, con la participación de estudiantes de pregrado con rol de semilleristas. Donde el objetivo principal es poner en práctica lo aprendido durante la carrera profesional de ingeniería industrial, y más específicamente en las asignaturas que hacen parte de la línea de investigación logística y de producción. Lo anterior, se verá reflejado en productos visibles de investigación, como ponencia en evento científico con registro de ISBN en resúmenes del evento.

3.4. Objetivos

3.4.1. Objetivo General

Gestionar la complejidad en la cadena de suministro del cacao en Bolívar, Colombia, mediante el análisis y diseño de estrategias basadas en tecnologías de Industria 4.0, que permita una mejora en la eficiencia, la coordinación entre agentes y una mayor competitividad del sector.

3.4.2. Objetivos Específicos

- Recolectar información a través de una revisión de la literatura sobre los ejes temáticos de la complejidad en cadenas de suministros y el ambiente de la industria 4.0
- Identificar los factores de complejidad en la cadena de suministro del cacao en Bolívar mediante el análisis de sus agentes, nodos y niveles de interacción, para establecer un diagnóstico que permita reconocer las áreas críticas que afectan la eficiencia y productividad.
- Desarrollar un conjunto de métricas e indicadores para medir la complejidad en la cadena de suministro del cacao, utilizando parámetros como la cantidad de enlaces, la variabilidad de la demanda y los tiempos de respuesta, que permitan una evaluación del impacto de la complejidad en el desempeño de la cadena.

- Proponer estrategias de gestión de la complejidad basadas en tecnologías de Industria 4.0, como IoT, blockchain y análisis de datos, adaptadas a las necesidades de la cadena de suministro del cacao en Bolívar, que permitan una mejora de la trazabilidad, la coordinación y la eficiencia entre los agentes.
- Evaluar la factibilidad y potencial impacto de las estrategias propuestas en los resultados operativos y económicos de la cadena de suministro del cacao en Bolívar, mediante el análisis de indicadores de eficiencia, productividad y sostenibilidad, que permitan una validación y beneficios esperados de las intervenciones tecnológicas.

3.5. Aspectos Teóricos

Estado del Arte / Antecedentes

Hoy por hoy, la gestión en la cadena de suministros se ha convertido en un concepto fundamental para que las empresas mejoren las relaciones con los clientes y proveedores, y desarrollen una ventaja competitiva. Lambert et al. definen la cadena de suministro como la alineación de empresas que traspasan un producto o servicio al mercado, en donde el cliente final constituye una parte integral de la misma (Lambert et al., 1998). Otras perspectivas más recientes las proporcionan Companys (2005) y Chandra & Tumanyan (2007), quienes establecen que la cadena de suministro es una red de organizaciones interrelacionadas que intervienen en diferentes fases del proceso productivo, mediante actividades que añaden valor, para satisfacción de los requerimientos de los clientes.

El concepto de cadena de suministro aparece claramente en los trabajos de Forrester, cuando sugirió que el éxito de las empresas dependía de la interacción entre los flujos de información, materiales, pedidos, dinero, mano de obra y equipos. La comprensión y control de estos flujos es el trabajo principal en la gestión. En sus experimentos de simulación, a través de un modelo de cadena de suministro compuesto por cuatro niveles (fábrica, almacén,

distribuidor y minorista), estudió el efecto bullwhip como uno de los efectos indeseados que el encadenamiento multietapas puede producir (Forrester, 1961). Después del trabajo de Forrester, fueron apareciendo otras definiciones de "Cadena de Suministro". Burns y Sivazlian (1978) la definieron como el conjunto de empresas que actúan en el diseño, ingeniería, mercadeo, fabricación y distribución de productos y servicios a los consumidores finales. Basado en las diferentes actividades que se desarrollan en una cadena de suministro, Stevens (1989) y Lee & Billington (1993) expresaron que: "Una cadena de suministro está conectada por una serie de actividades, como la planificación, coordinación, control de materiales y productos terminados, de acuerdo a las necesidades de los clientes", lo cual tiene que ver con dos flujos distintos dentro de la organización, uno de material y otro de información.

La complejidad en las cadenas de suministro está aumentando cada vez más porque se tienen que afrontar una serie de retos relacionados con los continuos cambios en los entornos en los que operan las empresas (Chryssolouris et al., 2013). Adicionalmente, se puede encontrar un aumento del número de nuevos modelos y variantes de productos, volatilidad de la demanda con altos niveles de incertidumbres, globalización, las expectativas de los clientes, reducción de costos, tiempos de entrega más cortos, etc.; como resultado, las cadenas de suministro crecen cada vez más en niveles de complejidad (Vickers & Kodarin, 2006). En Boysen et al. (2009) se muestra que la tendencia de personalización en masa hace aumentar la variedad y complejidad en líneas de producción.

En los últimos años, la investigación sobre la complejidad en las cadenas de suministro ha explorado múltiples perspectivas. Por ejemplo, Turner et al. (2018) desarrollaron un marco para entender cómo los gerentes responden a la complejidad en la cadena de suministro desde una perspectiva de ambidestreza, permitiendo equilibrar

soluciones existentes con enfoques innovadores. Aitken y Bozarth (2016) propusieron un modelo para diferenciar la complejidad estratégica de la disfuncional, guiando a las empresas en la absorción o eliminación de complejidad según sea necesario. Asimismo, Najjar y Yasin (2021) abordaron la gestión de la sostenibilidad en cadenas de suministro multinivel, proponiendo mecanismos adaptativos para manejar la complejidad en proveedores lejanos. Serdarasan (2013) y Xiaoxiao & Zikui (2019) analizaron los impulsores de la complejidad en cadenas de suministro, distinguiendo entre complejidad estática y dinámica para facilitar el desarrollo de estrategias de reducción. Bozarth et al. (2009) evaluaron el impacto negativo de la complejidad en el rendimiento de plantas de manufactura, subrayando la necesidad de reducir tanto la complejidad de detalle como la dinámica. Cheng et al. (2014) aplicaron un modelo de entropía para cuantificar la complejidad estructural en cadenas de suministro, proporcionando una herramienta útil para la gestión en entornos inciertos. Finalmente, investigaciones como las de Pathak et al. (2007) y Aelker et al. (2013) adoptaron el enfoque de Sistemas Adaptativos Complejos (CAS) para modelar y mejorar el comportamiento adaptativo de las cadenas de suministro en respuesta a la globalización y la dispersión de procesos.

La investigación sobre Cadenas de Suministro 4.0 en los últimos años ha abordado su sostenibilidad, ciberseguridad y tecnologías clave. Cañas et al. (2020) exploraron enfoques de sostenibilidad en cadenas de suministro 4.0, destacando la falta de atención a los aspectos sociales y un énfasis en tecnologías para la sostenibilidad ambiental. Dhamija et al. (2020) revisaron cómo la Industria 4.0, con tecnologías como el IoT y Big Data, impulsa la eficiencia y digitalización de la cadena de suministro. Además, Sobb et al. (2020) discutieron los desafíos de ciberseguridad específicos de las cadenas 4.0, como la interoperabilidad y la falta de estándares de seguridad. Frederico et al. (2019) introdujeron un marco de madurez para evaluar el avance hacia la Cadena de Suministro 4.0, integrando capacidades

tecnológicas y resultados estratégicos. Finalmente, Santhi y Muthuswamy (2022) resaltaron el potencial de la Industria 4.0 para mejorar la resiliencia y adaptabilidad de las cadenas de suministro frente a desafíos globales, como pandemias y conflictos.

Lo anterior son escenarios habilitadores para el desarrollo de la presente investigación, que propone gestionar eficazmente la complejidad inherente de la cadena de suministro del cacao mediante la integración de tecnologías 4.0. La meta es diseñar un modelo que permita identificar y medir los factores de complejidad de la cadena en Bolívar, y con ello proponer mejoras específicas que faciliten una gestión más efectiva.

Marco Conceptual

- Cadena de Suministro: La cadena de suministro es "una red de empresas que colabora para producir y entregar productos o servicios al cliente final, gestionando el flujo de materiales, información y finanzas" (Frizelle, 2004).
- Complejidad de la Cadena de Suministro: La complejidad en las cadenas de suministro se define como "la combinación de múltiples elementos interconectados que producen efectos dinámicos y a menudo impredecibles en el rendimiento de la cadena" (Bozarth et al., 2009).
- Complejidad Estructural: La complejidad estructural en la cadena de suministro se refiere a "la disposición de nodos y enlaces en la red de suministro, que determina la estructura básica de interacciones entre sus elementos" (Serdarasan, 2013).
- Complejidad Dinámica: Según Turner et al. (2018), la complejidad dinámica involucra "la incertidumbre y variabilidad en los tiempos de respuesta y en la demanda, lo cual requiere de adaptabilidad constante en la cadena de suministro".
- Modelado de Entropía: La entropía es un método cuantitativo para medir la complejidad en cadenas de suministro, que "evalúa el nivel de incertidumbre e

información requerido para gestionar el sistema de manera efectiva" (Cheng et al., 2014).

- Gestión de la Complejidad en Cadenas de Suministro: La gestión de la complejidad implica "la aplicación de estrategias para reducir o absorber la complejidad en la cadena de suministro, buscando minimizar sus efectos negativos sobre el rendimiento" (Najjar & Yasin, 2021).

3.6. Metodología

Se considera la metodología como un procedimiento general para lograr de una manera precisa los objetivos de la investigación. De lo anterior se deduce que la metodología de la investigación presenta los métodos y técnicas para realizar la investigación. A través de la metodología, se garantiza que los resultados obtenidos tengan el grado máximo de exactitud y confiabilidad (Bernal, 2006).

Figura 5

Metodología para el logro de los objetivos

Etapas	Actividades	Intervención
Primera Etapa Desarrollo de una revisión de la literatura	[A1] Realizar una revisión bibliográfica sobre factores de complejidad en cadenas de suministro agroindustriales, enfocándose en estudios de cadenas complejas y sistemas de cacao. [A2] Revisar de bases de datos, artículos científicos y desarrollar un estudio cienciometrico y bibliométrico.	SI
Segunda Etapa Diagnóstico sectorial	[A3] Elaborar un mapeo de la cadena de suministro del cacao en Bolívar, identificando los principales agentes, sus roles y niveles de interacción. [A4] Desarrollar un diagnóstico preliminar que detalle los factores de complejidad en cada etapa de la cadena de suministro.	SI

Tercera Etapa Desarrollo de métricas e indicadores	[A5] Definir y seleccionar metodologías y métricas existentes en la literatura para la medición de la complejidad en cadenas de suministro. [A6] Desarrollar una propuesta de indicadores de complejidad específicos para la cadena de suministro del cacao en Bolívar.	NO
Cuarta Etapa Desarrollo de métricas e indicadores	[A7] Analizar las tecnologías de Industria 4.0 más relevantes para la gestión de complejidad en cadenas de suministro, enfocándose en IoT, blockchain y análisis de datos. [A8] Diseñar propuestas específicas de estrategias de gestión de complejidad mediante tecnologías 4.0, considerando sus costos, viabilidad y el tipo de complejidad que abordan	NO
Quinta Etapa Evaluación de factibilidad	A9] Elaborar un modelo de evaluación de factibilidad que permita analizar los costos, beneficios y riesgos de implementar las tecnologías de Industria 4.0 en la cadena de suministro. [A10] Redactar un informe final que presente los resultados de la evaluación de factibilidad e impacto, con recomendaciones sobre los pasos futuros y posibles áreas de mejora.	NO

Tipo de investigación

Las investigaciones y estudios se desarrollan para impartir o adquirir conocimientos, motivo por el cual la selección del método es de suma importancia para así conocer la realidad. En relación a esto el presente trabajo aplicará varios tipos de investigación.

- Descriptiva: por lo que se busca poner en conocimiento todo lo relacionado en cuanto a características de la empresa seleccionada como caso práctico de estudio
- Cuantitativa: debido a los datos que serán procesados y analizados principalmente en la etapa de análisis de datos de entrada y de salida.
- Propositiva: dado que la investigación permitirá el desarrollo de la propuesta para el modelamiento metodológico y cuantitativo con visión de ser convertida en una herramienta de aplicación para la toma de decisiones en las organizaciones.

Población y muestra

Para el desarrollo de la presente investigación, de toda la población Agroindustrial del Departamento de Bolívar, se tomará de muestra el Sector Agroindustrial del Cacao y mediante la utilización de encuestas establecer las variables y parámetros necesarios para la construcción del modelo.

Técnicas de recolección de la información

Las técnicas que se llevarán a cabo consistirán en la observación, entrevistas no estructuradas y encuestas. Que permitirán recoger datos a fin de complementar la investigación, los instrumentos utilizados en esta investigación consistirán en una libreta de notas para la ejecución de las entrevistas y plantillas estructuradas para las encuestas.

3.7. Competencias investigativas

Durante el desarrollo del proyecto de investigación orientado al análisis de la complejidad en cadenas de suministro agroindustriales, particularmente en el sistema productivo del cacao en Bolívar, se fortalecieron las siguientes competencias investigativas:

1. Revisión y análisis crítico de literatura especializada: Se consolidó la habilidad para realizar búsquedas bibliográficas exhaustivas sobre temas complejos y específicos, como la complejidad en cadenas de suministro. Esta competencia incluyó la evaluación crítica de fuentes académicas, el reconocimiento de enfoques teóricos relevantes y la capacidad para estructurar un marco teórico coherente y actualizado.
2. Análisis bibliométrico y cienciométrico: Se adquirieron competencias para aplicar herramientas bibliométricas con el fin de mapear la producción científica en torno a

las cadenas de suministro y su complejidad. Esto permitió identificar tendencias, vacíos de investigación, autores influyentes y posibles líneas futuras de estudio.

3. Cartografía y análisis estructural de cadenas de suministro: Se desarrolló la capacidad para representar gráficamente cadenas productivas complejas, identificar los agentes involucrados, sus funciones, y los niveles de interacción entre ellos. Esta competencia permitió comprender de forma integral la estructura y funcionamiento del sistema de cacao en Bolívar.

4. Diagnóstico y análisis de factores de complejidad: Se fortaleció la habilidad para observar críticamente procesos reales, descomponerlos por etapas y reconocer los factores que generan complejidad a nivel logístico, operativo y organizacional dentro de una cadena de suministro agroindustrial.

3.8. Productos resultados de investigación

En el desarrollo del proyecto, los estudiantes de pregrado realizaron aportes significativos que se reflejaron en diferentes productos; Ponencia, Capítulo de libro, Libro resultado de investigacion y consultoria empresarial Gracias a este compromiso, fue posible participar en un evento científico internacional, donde se presentó un artículo y se contribuyó con publicaciones derivadas de la investigación. Esta experiencia fortaleció las habilidades investigativas de los estudiantes y permitió compartir los resultados en un espacio académico de alto nivel.

Tabla 6

Eventos de divulgación académica y objetivos específicos intervenidos

Evento	Producto	Objetivos específicos intervenidos	Fecha
XVI Congreso Internacional Gestión del Conocimiento: Perspectiva Multidisciplinaria	Ponencia	Objetivo específico 1, Objetivo específico 2	08 y 09 de julio de 2025

Consultoría aportada por los Estudiantes de pregrado vinculado:

Tabla 7

Consultoría empresarial realizada a la Asociación Cacao de Mujeres Montemarianas y objetivos específicos intervenidos

Empresa	Producto	Objetivos específicos intervenidos	Fecha
Asociación cacao de mujeres Montemarianas	Consultoría empresarial	Objetivo específico 1, Objetivo específico 2	01 de junio de 2025

Figura 6

Certificado de aprobación de ponencia en el XVI Congreso Internacional de Gestión del Conocimiento – 2025

Figura 7.

Documentos soporte de consultoría

GERMAN HERRERA VIDAL - 9.239.539
LEONARDO OLARTE JIMENEZ - 1.048.276.114
MIGUEL ANGEL BUELVAS GALLO - 1.052.096.855
KEVIN ENRIQUE PUELLO MARTÍNEZ - 1.043.960.350

ACTA DE RECIBIDO A SATISFACCION
CONSULTORIA CIENTIFICO TECNOLOGICA

El suscrito
REPRESENTANTE LEGAL
ASOCIACIÓN CACAO DE MUJERES MONTEMARIANAS

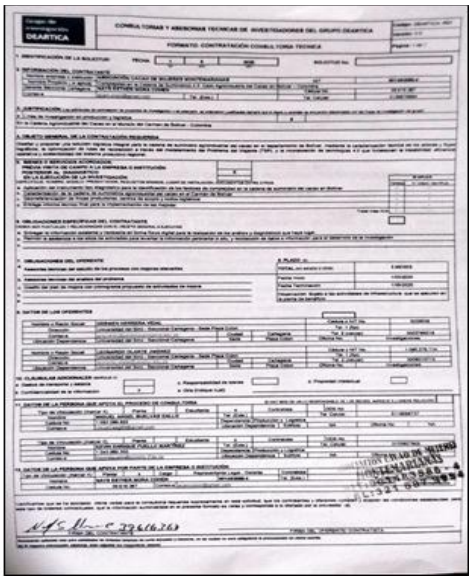
HACE CONSTAR:

Que recibí a satisfacción el servicio prestado por los investigadores **GERMAN HERRERA VIDAL,** identificado con CC 9239539, **LEONARDO OLARTE JIMENEZ,** identificado con CC 1.048.276.114, y semilleristas de la Escuela de Ingeniería Industrial **MIGUEL ANGEL BUELVAS GALLO**, identificado con CC 1.052.096.855, y **KEVIN ENRIQUE PUELLO MARTÍNEZ,** identificado con CC 1043960350. En cumplimiento con lo establecido en el formato de consultoría e Informe técnico avalado por el Grupo de investigación DeArtica de la Universidad del Sinú – Seccional Cartagena consiste en:

- Aplicación del instrumento tipo diagnóstico para la identificación de los factores de complejidad en la cadena de suministro del cacao en Bolívar mediante el análisis de sus agentes, nodos y niveles de interacción, para establecer un diagnóstico que permita reconocer las áreas críticas que afectan la eficiencia y productividad.
- Caracterización de la cadena de suministros agroindustrial del cacao en el Carmen de Bolívar. Para la identificación de actores, relaciones, procesos, flujos y operaciones de producción, almacenamiento y transporte.
- Georreferenciación de fincas productoras, centros de acopio y nodos logísticos mediante entrevistas, datos satelitales y registros locales, con el objetivo de estructurar una matriz de distancias y demandas.
- Entrega informe técnico final para la implementación de las mejoras

Servicio que fue terminado de prestar el 01 de Junio de 2025
En constancia de lo anterior, se firma a los 01 de Junio de 2025

37646367
NAYS ESTHER MORA COHEN
Asociación cacao de mujeres Montemarianas
REPRESENTANTE LEGAL.
Nit de la asociación: 901483586-4



4. RESULTADOS

4.1 Resultados del proyecto P001

La propuesta de modelado comparativo para la optimización en la gestión de inventarios, busca determinar los tamaños de lotes óptimos a pedir y establecer el mejor método que permita la minimización de los costos totales de inventarios. Para su desarrollo se tendrán en cuenta ocho modelos establecidos en la propuesta metodológica. formuladas. La sección se encuentra separada por nueve (9) apartados que dan respuesta y análisis a cada una, (i) Modelo lote a lote - LFL, (ii) Modelo periodo constante – CP, (iii) Modelo de cantidad económica de pedido - EOQ, (iv) Modelo de cantidad periódica de pedido - EPQ, (v) Mínimo costo unitario - CUM, (vi) Balanceo de periodo fragmentado - BPF, (vii) Algoritmo de Wagner Within – WW, (viii) Algoritmo de Silver Meal – SM y (ix) Modelo de Optimización . OPT y Simulación – SIM.

Modelo Lote a Lote - LFL

El modelo de inventario lote a lote es una política utilizada en la gestión de inventarios para determinar la cantidad óptima de unidades a pedir en cada pedido, basado en el tamaño de los lotes y la frecuencia de la demanda, se basa en varios supuestos, incluyendo la demanda constante y conocida, el tiempo de entrega fijo y conocido, la capacidad ilimitada de almacenamiento y la ausencia de descuentos por cantidad. De acuerdo con Biggs, (1979) se ordena exactamente lo que se necesita en la próxima producción, donde el período o "cubo de tiempo" se establece en un horizonte semanal.

Para efectos de aplicabilidad del modelo LFL en el caso de estudio, se detallan cada uno de los cálculos de los componentes:

Inventario final

Demanda – Producción

Como se piden las mismas unidades a producir en cada uno de los periodos según las necesidades netas de la demanda, no se generan inventarios finales, por tanto las unidades en cada periodo es cero (0).

Costo de mantener inventario (H)

Inventario final*Cost per Unit (V)*Holding Cost (H)

El costo de mantener inventario (H) resulta de multiplicar las unidades en inventario final por el costo por unidad (V) por el costo de almacenar (H). Como no se generan inventarios finales, por tanto el costo es cero (0) en todos los periodos.

Costo de preparación (S)

Corresponde a un costo fijo si en determinado periodo se realiza una producción. Dado que existen pedidos semanales, el costo fijo de preparación corresponde a Usd 107.

Costo total

Holding Cost (H) + Cost to Order (S)

Los cálculos de cada costo total se hacen primeramente por periodo y se van incrementado de manera acumulada para determinar el costo de la política al final de los todos los periodos de Usd 856. Cabe resaltar que el planteamiento de estos cálculos sirve de base para este modelo y los siguientes que se proponen.

La tabla 8 muestra la política de inventario utilizando el método LFL. El costo total de pedido resultante es Usd 856,00 para 8 pedidos, sin costos de mantenimiento porque no hay

artículos almacenados. Por lo tanto, el costo total del inventario usando el método LFL es Usd 856,00.

Tabla 8

Modelo Lote a Lote (LFL)

Periodo (Sem)	Cantidad	Producción	Inventario Final	H (Usd)	S (Usd)	Costo Total (Usd)
1	7500	7500	0	0	107,00	107,00
2	9000	9000	0	0	107,00	214,00
3	10500	10500	0	0	107,00	321,00
4	9000	9000	0	0	107,00	428,00
5	14250	14250	0	0	107,00	535,00
6	11250	11250	0	0	107,00	642,00
7	9000	9000	0	0	107,00	749,00
8	8250	8250	0	0	107,00	**856,00**

Nota. Elaboración propia a partir de la aplicación del modelo LFL.

Modelo Periodo Constante – CP.

Este modelo realiza un pedido constante de una cantidad fija de productos después de un intervalo de tiempo predefinido. El objetivo es mantener el inventario en un nivel constante mientras se minimizan los costos de almacenamiento y pedido. La política se basa en una tasa de demanda y tiempo de producción de naturaleza constante. Un trabajo investigativo desarrollado por Nursyanti & Shalsabila, (2020) establecen que es el método más utilizado como política para la gestión de inventarios. Inicialmente se determina el periodo constante de recepción, equivalente a 4 semanas, se suman las necesidades de acuerdo a este parámetro y se calculan los inventarios finales, restando el consumo de la semana 1, quedando el disponible para la semana 2, este procedimiento se aplica cada 4 semana.

Los resultados obtuvieron el tamaño de lote de pedido óptimo. Los pedidos se hicieron 2 veces. En el primer pedido, el tamaño del lote es de 36000 para satisfacer las

necesidades del período 1 al 4. En el segundo pedido, el tamaño del lote es de 42750 para satisfacer las necesidades de los períodos 5 al 8. El costo total de pedido resultante es Usd 380,50 para 2 pedidos, incurriendo en costos de mantenimiento de inventarios y de pedidos durante esos pedidos (Ver tabla 9).

Tabla 9

Modelo Periodo Constante (CP)

Periodo (Sem)	Cantidad	Producción	Inventario Final	H (Usd)	S (Usd)	Costo Total (Usd)
1	7500	36000	28500	42,75	107,00	149,75
2	9000		19500	29,25	0,00	179,00
3	10500		9000	13,50	0,00	192,50
4	9000		0	0,00	0,00	192,50
5	14250	42750	28500	42,75	107,00	342,25
6	11250		17250	25,88	0,00	368,13
7	9000		8250	12,38	0,00	380,50
8	8250		0	0,00	0,00	**380,50**

Nota. Elaboración propia basada en la aplicación del modelo CP.

Modelo de cantidad económica de pedido - EOQ

Modelo propuesto por Harris (1913) aplicado cuando se mantiene un sistema de reaprovisionamiento continuo con variables determinísticas. Es una técnica utilizada para determinar el tamaño óptimo del pedido de un producto que minimice los costos totales de inventario. Este modelo se basa en la idea de que hay un costo de pedido y un costo de mantenimiento de inventario asociado con la cantidad de unidades ordenadas. El modelo tiene algunas limitaciones, como la suposición de una demanda constante y la falta de consideración de las fluctuaciones en los precios del producto y los costos de pedido.

La ecuación 1 expresa la fórmula para calcular la cantidad óptima de pedido (Q*).

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DS}{H}}$$

Donde:

D: Demanda anual del producto (en unidades)

S: Costo de preparación del pedido (en dólares)

H: Costo de mantenimiento del inventario por unidad por año (en dólares)

Una vez que se ha calculado la cantidad óptima de pedido, se determina el número de pedidos que se realizarán durante el año (f) dividiendo la demanda total del producto entre la cantidad óptima de pedido. A partir de ahí, se puede calcular el tiempo entre pedidos (T*) dividiendo el número de periodos entre el número de pedidos.

$$f = \frac{Dt}{Q^*}$$

$$T^* = \frac{N}{f}$$

Donde:

F: Frecuencia de pedidos

T*: Tiempo entre pedidos

Dt: Demanda total del producto (en unidades)

Q*: Cantidad optima de pedido

N: Número de periodos

Los resultados obtuvieron la cantidad optima de pedido (Q*) de 20526 unidades, con una frecuencia de 4 pedidos y un tiempo entre pedidos de cada dos (2) semanas. Los pedidos se hicieron 4 veces. El costo total de pedido resultante es Usd 521,8 para 4 pedidos, incurriendo en costos de mantenimiento de inventarios y de pedidos durante esos pedidos (Ver tabla 10).

Tabla 10

Modelo Cantidad Económica de Pedido (EOQ)

Periodo (Sem)	Cantidad	Producción	Inventario Final	H (Usd)	S (Usd)	Costo Total (Usd)
1	7500	20526	13026	$ 19,54	$ 107,0	$ 126,5
2	9000		4026	$ 6,04	$ 0,00	$ 132,6
3	10500	20526	14052	$ 21,08	$ 107,0	$ 260,7
4	9000		5052	$ 7,58	$ 0,00	$ 268,2
5	14250	20526	11328	$ 16,99	$ 107,0	$ 392,2
6	11250		78	$ 0,12	$ 0,00	$ 392,3
7	9000	20526	11604	$ 17,41	$ 107,0	$ 516,7
8	8250		3354	$ 5,03	$ 0,00	**$ 521,8**

Nota. Elaboración propia a partir del modelo EOQ

Modelo de cantidad periódica de pedido - EPQ

El modelo asume que la demanda del producto, el tiempo de producción y tiempo de entrega son constantes y conocidas, también asume que el costo de producción por unidad y el costo de mantener el inventario por unidad tienen las mismas consideraciones (Orlicky 1975). Se utiliza para determinar la cantidad óptima de producción o pedido que minimiza el costo total, que incluye el costo de producción, el costo de mantenimiento del inventario y el costo de realizar pedidos. La ecuación 4 expresa la formulación matemática para su cálculo.

Dado el cálculo del Q* igual a 20526 unidades, con un f igual a cuatro (4) y un T* equivalente a dos (2). Los resultados obtuvieron el tamaño de lote de pedido óptimo. Los pedidos se hicieron 4 veces. En el primer pedido, el tamaño del lote es de 16500 para satisfacer las necesidades del período 1 al 2. En el segundo pedido, el tamaño del lote es de 19500 para satisfacer las necesidades de los períodos 3 al 4. . En el tercer pedido, el tamaño del lote es de 25500 para satisfacer las necesidades del período 5 al 6. Y en el cuarto pedido,

el tamaño del lote es de 17250 para satisfacer las necesidades de los períodos 7 al 8. El costo total de pedido resultante es Usd 484,3 para 4 pedidos, incurriendo en costos de mantenimiento de inventarios y de pedidos durante esos pedidos (Ver tabla 11).

Tabla 11

Modelo Cantidad Periódica de Pedido (EPQ)

Periodo (Sem)	Cantidad	Producción	Inventario Final	H (Usd)	S (Usd)	Costo Total (Usd)
1	7500	16500	9000	$ 13,50	$ 107,0	$ 120,5
2	9000		0	$ 0,00	$ 0	$ 120,5
3	10500	19500	9000	$ 13,50	$ 107,0	$ 241,0
4	9000		0	$ 0,00	$ 0	$ 241,0
5	14250	25500	11250	$ 16,88	$ 107,0	$ 364,9
6	11250		0	$ 0,00	$ 0,0	$ 364,9
7	9000	17250	8250	$ 12,38	$ 107,0	$ 484,3
8	8250		0	$ 0,00	$ 0	**$ 484,3**

Nota. Elaboración propia a partir del modelo EPQ.

Modelo Mínimo Costo Unitario - CUM

El modelo se basa en el costo variable promedio por unidad en un tiempo determinado (Chase y Aquilano, 1995; Sipper y Bulfin, 1998;). El objetivo y las supociones son iguales a los modelos anteriores. La ecuación 4 expresa la fórmula para calcular el costo variable promedio por unidad (Km).

$$K_m = \frac{S + HD_2 + 2HD_3 + \cdots + (m-1)HD_m}{D_1 + D_2 + \cdots + D_m}$$

Donde:

Km: Costo variable promedio por unidad

Dm: Demanda por periodo

m: 1,2…,n se detiene cuando K(m+1) > Km

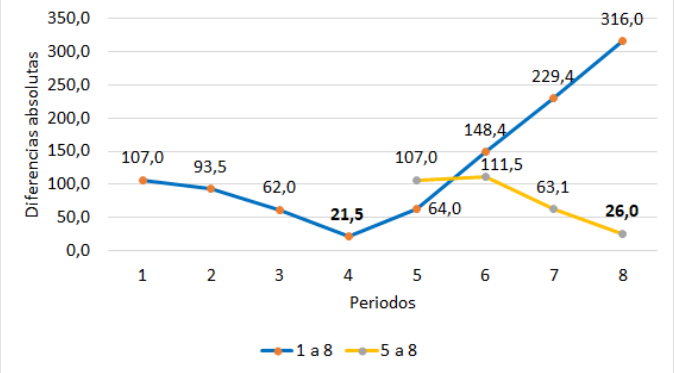
Inicialmente se determina la diferencia absoluta entre los costos de mantenimiento y los costos de pedir desde el periodo 1 hasta el periodo 8, se identifica el periodo de menor costo cuando se hace un calculo desde el periodo 1 al periodo 4 igual a 21,5. Se desarrolla el mismo procedimiento entre el periodo 5 al periodo 8, identificando menor costo desde el periodo 5 al 8 igual a 26,0 (Ver figura 8).

MODELO MINIMO COSTO TOTAL

Period	Cantidad	Cálculo del Lote	Producción	Inventario Final	Costo Mantenimiento	Costo de Preparación	Costo Total	1 a 8
1	7500	1	7500	0	$ 0,0	$ 107,0	$ 107,0	107,0
2	9000	1a2	16500	9000	$ 13,5	$ 107,0	$ 120,5	93,5
3	10500	1a3	27000	30000	$ 45,0	$ 107,0	$ 152,0	62,0
4	9000	**1a4**	36000	57000	$ 85,5	$ 107,0	$ 192,5	**21,5**
5	14250	1a5	50250	114000	$ 171,0	$ 107,0	$ 278,0	64,0
6	11250	1a6	61500	170250	$ 255,4	$ 107,0	$ 362,4	148,4
7	9000	1a7	70500	224250	$ 336,4	$ 107,0	$ 443,4	229,4
8	8250	1a8	78750	282000	$ 423,0	$ 107,0	$ 530,0	316,0
								21,5

Figura 8

Determinación de frecuencias de pedidos según CUM



Nota. Elaboración propia.

Se obtuvo un costo total de pedido resultante es Usd 380,5 para 2 pedidos, incurriendo en costos de mantenimiento de inventarios y de pedidos durante esos pedidos (Ver tabla 12).

Tabla 12

Modelo Mínimo Costo Unitario (CUM)

Periodo (Sem)	Cantidad	Lote	Producción	Inventario Final	H (Usd)	S (Usd)	Costo Total (Usd)
1	7500	1 a 4	36000	28500	$ 42,8	$ 107,0	$ 149,8
2	9000			19500	$ 29,3	$ 0,0	$ 179,0
3	10500			9000	$ 13,5	$ 0,0	$ 192,5
4	9000			0	$ 0,0	$ 0,0	$ 192,5
5	14250	5 a 8	42750	28500	$ 42,8	$ 107,0	$ 342,3
6	11250			17250	$ 25,9	$ 0,0	$ 368,1
7	9000			8250	$ 12,4	$ 0,0	$ 380,5
8	8250			0	$ 0,0	$ 0,0	**$ 380,5**

Nota. Elaboración propia con base en el modelo CUM

Balanceo de Periodo Fragmentado - BPF

El modelo intenta minimizar la suma del costo variable para todos los lotes (Sipper 1999), equilibrando el costo de ordenar y el costo de mantener el inventario, tomando en cuenta las necesidades futuras del siguiente lote (Vidal Holguín, 2017). El equilibrio de unidades entre periodos genera una tasa llamada factor de periodo fragmentado (FPF), que es la relación entre el costo de ordenar y mantener el inventaros. La ecuación 5 denota la formula para calcular los periodos fragmentados (PF) en el modelo BPF.

$$PF_1 = 0$$

$$PF_2 = D_2$$

$$PF_3 = D_2 + 2D_3$$

$$PF_4 = D_2 + 2D_3 + (m-1)D_m$$

Donde:

PF: Periodo fragmentado para m periodos

Dm: Demanda por periodo

Primeramente, se determina la diferencia absoluta entre los costos de mantenimiento y los costos de pedir de forma fragmentada hasta encontrar un mínimo costo (ver tabla 13).

Tabla 13

Cálculos de lotes fragmentados para el modelo BPF

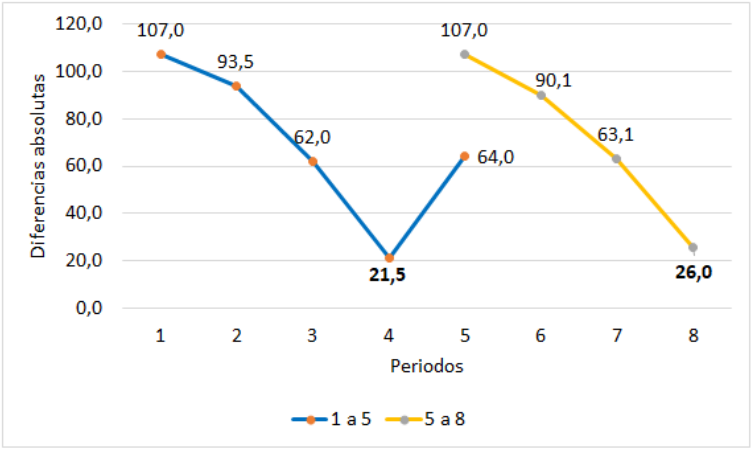
Cantidad	Cálculo del Lote	Producción	Inventario Final	H (Usd)	S (Usd)	Diferencia
7500	1	7500	0	$ 0,0	$ 107,0	107,0
9000	1 y 2	16500	9000	$ 13,5	$ 107,0	93,5
10500	1,2 y 3	27000	30000	$ 45,0	$ 107,0	62,0
9000	1, 2, 3 y 4	36000	57000	$ 85,5	$ 107,0	**21,5**
14250	1, 2, 3, 4 y 5	50250	114000	$ 171,0	$ 107,0	64,0
14250	5	14250	0	$ 0,0	$ 107,0	107,0
11250	5 y 6	25500	11250	$ 16,9	$ 107,0	90,1
9000	5, 6 y 7	34500	29250	$ 43,9	$ 107,0	63,1
8250	5, 6, 7 y 8	42750	54000	$ 81,0	$ 107,0	**26,0**

Nota. Elaboración propia a partir del modelo BPF.

La figura 9 evidencia un menor costo cuando se opera en periodos fragmentados de 1 a 4 con una diferencia absoluta de 21,5. De igual forma para los periodos de 5 a 8 con 26,0.

Figura 9

Determinación de periodos fragmentados



Nota. Elaboración propia.

Los resultados obtuvieron un costo total de pedido resultante es Usd 380,5 igual que el modelo de CUM para 2 pedidos, incurriendo en costos de mantenimiento de inventarios y de pedidos durante esos pedidos (Ver tabla 12).

Algoritmo de Wagner Within - WW

Desarrollado por Harvey Wagner y Thomson Whitin en el año de 1958 con el objetivo de obtener soluciones óptimas para los problemas de la gestión de inventarios; por medio de programación dinámica (Wagner & Whitin 1958). Se desarrolla en el cálculo de una matriz de costos variables para todas las alternativas de pedidos durante un horizonte de tiempo (Nunes, 2015). Este algoritmo tiene como objetivo minimizar el costo por ordenar y de mantener el inventario; dando como resultado un costo mínimo por una cantidad por ordenar optima, evaluando todas las maneras posibles de ordenar a fin de cubrir la demanda en cada horizonte.

La ecuación 6 y 7 denotan las fórmulas para calcular la matriz de periodos y los periodos seleccionados en el modelo WW.

$$K_{tl} = H + S\left[\sum_{j=t}^{l}(j-t)D_j\right] \quad j \geq 1$$

$$K_l = \ min_t = 1,2,\dots,l\{K_{t-1} + K_{t,l}\}$$

$$l = 1,2,\dots,N$$

Donde:

Dj = Demanda para el periodo j

Kl = Costo mínimo del periodo1 al l con inventario cero al final del periodo l

Se inicia determinando los costos de inventario a partir de la matriz cuadrada de periodos aplicando la ecuación 6, consecuentemente se calculan los costos mínimos y se establecen los lotes seleccionados teniendo en cuenta la ecuación 7 (ver tabla 9). Los resultados obtuvieron un costo total de pedido resultante es Usd 380,5 igual que el modelo de CUM y BPF para 2 pedidos de 1 a 4 y de 5 a 8, incurriendo en costos de mantenimiento de inventarios y de pedidos durante esos pedidos (Ver tabla 12).

Tabla 14

Cálculos de costos y selección de lotes para el modelo WW

Periodo	1	2	3	4	5	6	7	8
1	107,00	120,50	152,00	**192,50**	278,00	362,38	443,38	530,00
2		214,00	229,75	256,75	320,88	388,38	455,88	530,13
3			227,50	241,00	283,75	334,38	388,38	450,25
4				259,00	280,38	314,13	354,63	404,13
5					299,50	316,38	343,38	**380,50**
6						385,00	398,50	423,25
7							421,13	433,50
8								450,38
K(min)	107,00	120,50	152,00	192,50	278,00	314,13	343,38	**380,50**

Nota. Elaboración propia a partir del modelo WW.

Algoritmo de Silver Meal – SM.

Creado por Halan Meal y Edwars Silver en 1973, el objetivo del algoritmo de Silver Meal es minimizar el costo de realizar pedidos y mantener el inventario en periodos (Silver & Meal, 1973), para su desarrollo se cálculos los costos totales que son iguales a la suma de los costos del pedido más los costos de mantenimiento, y se dividen por el número de periodos de la demanda, lo que lleva a un valor promedio. Los cálculos o la función se detienen cuando aumentan los costos totales (Muñoz, 2017). La ecuación 8 denota la expresión matemática para su cálculo.

$$K_m = \frac{1}{m} \left(S + HD_2 + 2HD_3 + \cdots + (m-1)HD_m \right.$$

Donde:

Km: Costo variable promedio por periodo

M: 1,2…,n. Se detiene el procedimiento cuando K(m+1) > Km

Primeramente, se determina el valor del km para cada uno de los periodos a partir del costo total (ver tabla 15). Evaluando todos los periodos desde 1 a 8 se evidencia un costo inferior en el periodo 4, por consiguiente, se desarrolla nuevamente el algoritmo desde el 5 a 8.

Tabla 15

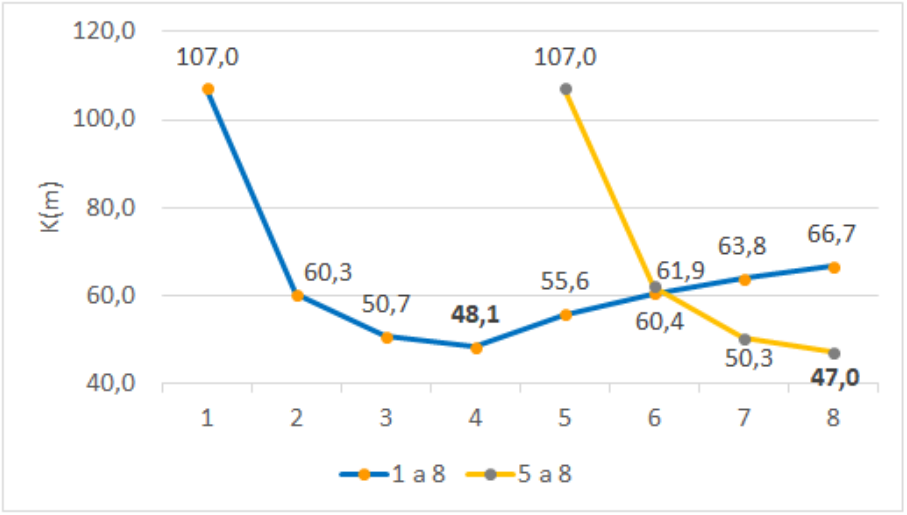
Cálculo de Km y selección de lotes para el modelo SM

Periodo	Cantidad	CTS=S	D2*H*(1)	D3*H*(2)	D4*H*(3)	D5*H*(4)	D6*H*(5)	D7*H*(6)	D8*H*(7)	CostoTotal	K(m)
1	7500	107								107,0	107,0
2	9000		13,50							120,5	60,3
3	10500			31,50						152,0	50,7
4	9000				40,50					192,5	**48,1**
5	14250					85,50				278,0	55,6
6	11250						84,38			362,4	60,4
7	9000							84,38		446,8	63,8
8	8250								86,63	533,4	66,7

La figura 10 evidencia los menores costos en dos periodos 4 y 8 con valores de 48,1 y 47,0 respectivamente. Dado lo anterior, se calculan los costos totales de inventario, equivalentes a Usd 380,5 igual que los modelos de CUM, BPF y WW para una frecuencia de 2 pedidos, incurriendo en costos de mantenimiento de inventarios y de pedidos durante esos pedidos (Ver tabla 12).

Figura 10

Determinación de Costos variables promedios (Km)



Nota. Elaboración propia.

Modelo de Optimización – OPT y Simulación - SIM

El modelo parte de unos supuestos, (i) la demanda es conocida, (ii) El lead time es determinístico y conocido para cada producto, (iii) No están permitidos faltantes de inventario o demanda insatisfecha, (iv) No se considera descuento por cantidad en los pedidos y (v) Los costos no varían de manera significativa en el tiempo. La formulación matemática considera dos conjuntos "i" productos y "j" periodos, describen parámetros asociados a la demanda de productos (D_{ij}), el costo de pedir (S), costo de mantener (H), Costo por unidad (V), el tiempo de pedido (LeadTime) y el inventario inicial del producto (InvIn). También declara unas variables ligadas con la cantidad a ordenar (Q_{ij}), el inventario final del producto ($Stock_{ij}$) y la variable binaria de decisión de realizar un pedido de un producto (B_{ij}).

La función objetivo (ZMin) consiste en minimizar los costos de inventarios, la ecuación 1 corresponde a la sumatoria de los costos de realizar un pedido más la sumatoria de los costos de mantener producto en inventario, con limitaciones del modelo, donde la ecuación 2 calcula el flujo de balance de inventario que tiene como resultado el total de unidades a almacenar, la Ecuación 3 asigna el inventario inicial, la ecuación 4 y 5 restringe el tamaño del lote de unidades a pedir, la ecuación 6 y 7 limita las unidades a pedir mediante la introducción de la variable binaria, la ecuación 8 y 9 son las restricciones de no negatividad de variables y la ecuación 10 restricción de variable binaria.

$$Z_{Min} = \sum_{i}^{M}\sum_{j}^{N} S * B_{i,j} + \sum_{i}^{M}\sum_{j}^{N} Stock_{i,j} * H * V$$

Restricciones

$$Stock_{i,j} = Stock_{i,j-1} - D_{i,j} + Q_{i,j-LeadTime} \qquad \forall_i, 1 < \forall_j \leq LeadTime$$

$$Stock_{i,j} = InvIn_i + Q_{i,j} - D_{i,j} \qquad \forall_i, \forall_j = 1$$

$$Stock_{i,j} = Stock_{i,j-1} + Q_{i,j} - D_{i,j} \qquad \forall_i, LeadTime + 2 \leq \forall_j \leq Lot$$

$$Stock_{i,j} = Q_{i,j} - D_{i,j} \qquad \forall_i, \forall_j = LeadTime + 1$$

$$Q_{i,j} \geq B_{i,j} \qquad \forall_i, \forall_j > 1$$

$$Q_{i,j} \leq Big * B_{i,j}$$

$$Q_{i,j} \geq 0 \qquad \forall_i, \forall_j$$

$$Stock_{i,j} \geq 0 \qquad \forall_i, \forall_j$$

$$B_{i,j} \in \{0,1\} \qquad \forall_i, \forall_j$$

Para el desarrollo del modelo de programación lineal se utilizó un equipo con características de 8 GB de memoria RAM, procesador 11th Gen Intel(R) Core(TM) i5 y un sistema operativo de 64 bits con Windows 11. Para determinar el resultado óptimo de las variables se utilizó la ayuda del software GAMS (General Algebraic Modeling System), siendo un lenguaje de modelización para resolver problemas de optimización.

Los resultados del modelo evidencian una solución a las variables de decisión (ver tabla 16), minimizando los costos totales de inventario a Usd 380,50 considerando un solo producto.

Tabla 16

Resultados de las variables obtenidos en Gams

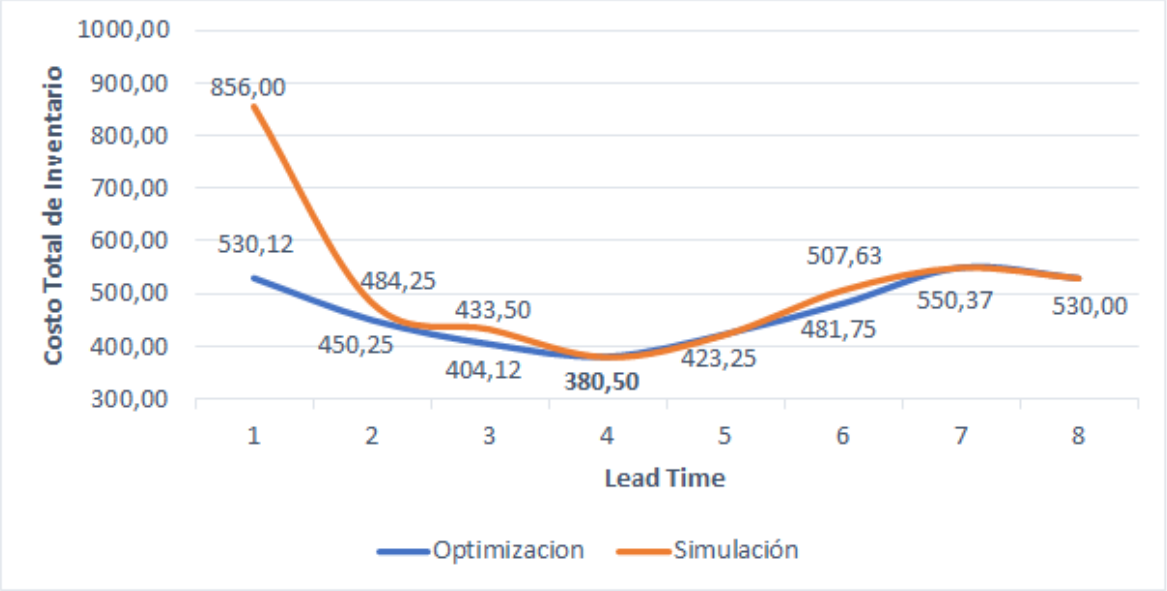
Periodo	Qij – Cantidad a ordenar	Bij – Periodo a pedir	Stockij – Inventario final
1	36000	1	28500
2	0	0	19500
3	0	0	9000
4	0	0	0
5	42750	1	28500
6	0	0	17250
7	0	0	8250
8	0	0	0

Nota. Elaboración propia a partir de resultados generados en GAMS.

El modelo de simulación con ambiente determinístico, permitió experimentar ocho (8) escenarios considerando los cambios posibles en la variable discreta tiempo de pedido (Lead time). El objetivo es poder escoger una política adecuada de inventarios que resulte en un buen servicio a los clientes y a un costo razonable. La figura 11 evidencia un comparativo en el comportamiento de los costos cuando los modelos de optimización y de simulación, siendo favorable para ambos casos un escenario de cada cuatro (4) periodos y pedidos.

Figura 11

Resultado del modelo de optimización y simulación



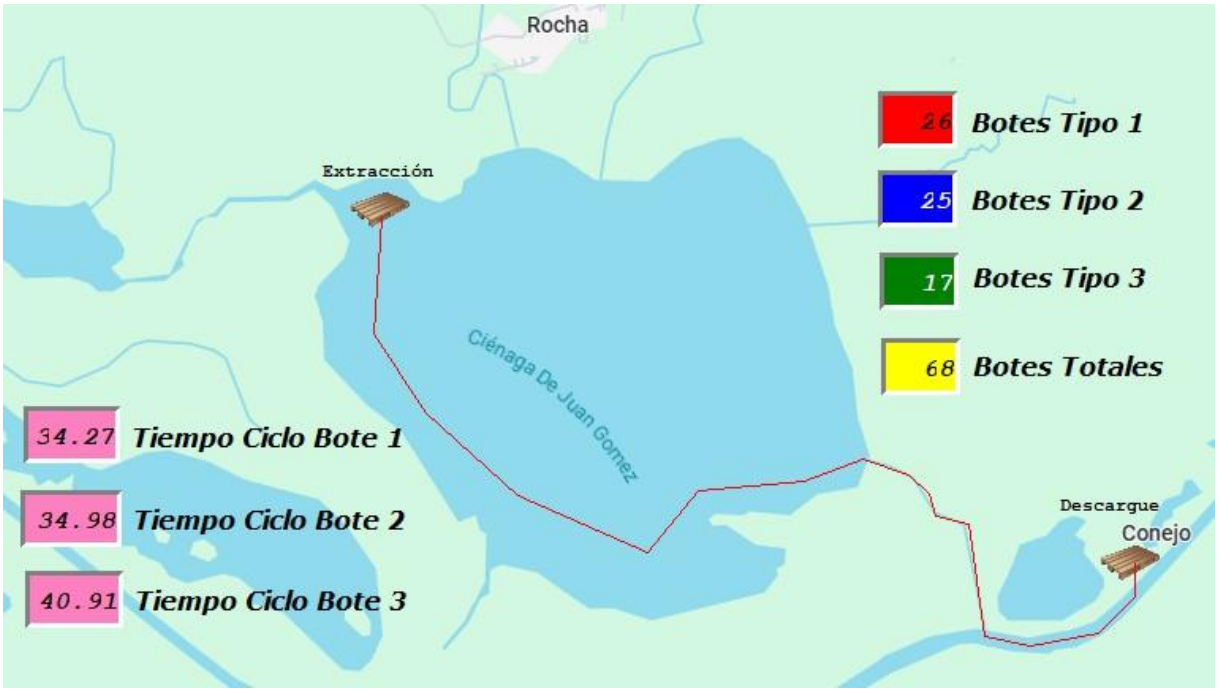
Nota. Elaboración propia.

4.2 Resultados del proyecto P002

La configuración de corrida del modelo se estructura a partir de la hora de inicio de la jornada de trabajo (8:00 am) hasta la hora final (2:00 pm), correspondiente a un tiempo de corrida de 6 horas. Para validar correctamente el modelo y tener una visión más precisa del comportamiento del sistema, de manera representativa se utilizaron 30 réplicas (ver figura 12).

Figura 12

Resultado de la simulación en ProModel



Una vez realizada la simulación, los indicadores que evalúan el rendimiento del sistema actual se enmarcan en el número de botes que operan y el tiempo de ciclo promedio. La tabla 5 muestra los resultados obtenidos (véase la tabla 17).

Tabla 17

Indicadores resultados de la simulación

Entidad	Cantidad	Tiempo en Sistema	Tiempo en Operación
Bote 1	26	33.07 min	32.37 min
Bote 2	25	39.42 min	38.72 min
Bote 3	17	45.53 min	44.82 min

Un análisis más profundo, a partir de la comparación de los indicadores de eficiencias entre los tres (3) botes en términos de tiempo en sistema, tiempo en operación, y cantidad procesada (ver figura 13). Los hallazgos principales son:

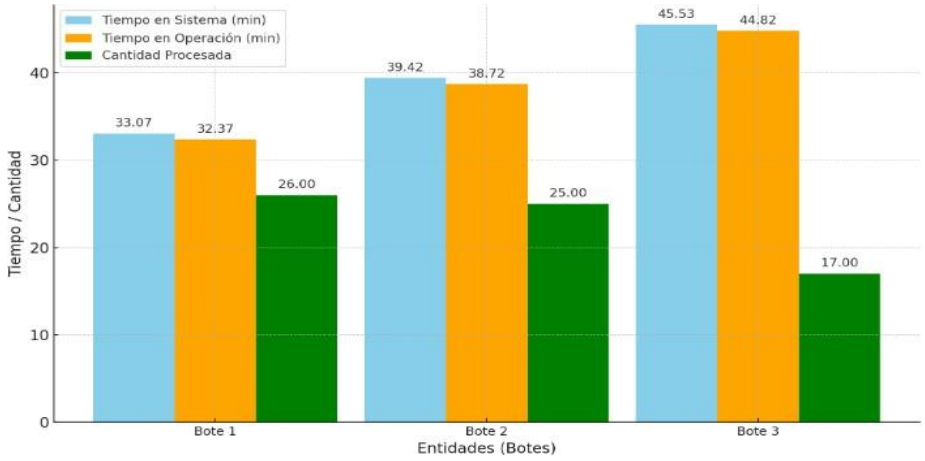
- El Bote 1 muestra el mejor balance con el menor tiempo en sistema (33.07 min) y operación (32.37 min), junto con la mayor cantidad procesada (26 unidades),

indicando un desempeño más eficiente.

- El Bote 2 ocupa una posición intermedia en cuanto a tiempo y cantidad procesada
- El Bote 3 tiene los mayores tiempos en sistema (45.53 min) y en operación (44.82 min), pero procesa significativamente menos cantidad (17 unidades), lo que refleja una menor eficiencia operativa.

Figura 13

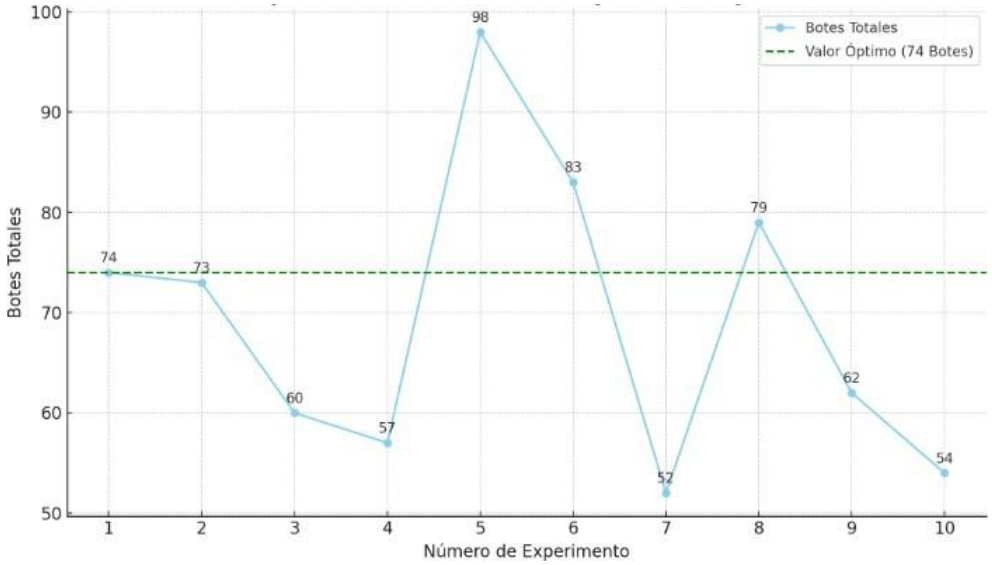
Comparación de eficiencias entre entidades



El uso de SimRunner permitió optimizar el sistema de simulación, identificando configuraciones robustas y eficientes. La configuración óptima de 74 botes no solo ofrece el mejor rendimiento, sino que también proporciona una guía clara para gestionar recursos y planificar operaciones de manera sostenible y efectiva. Estos hallazgos demuestran la capacidad de la simulación y la optimización para resolver problemas complejos en contextos logísticos fluviales. La configuración óptima identificada corresponde a un total de 74 botes, logrando un valor óptimo de la función objetivo de 29.706, dentro de un intervalo de confianza del 95% que varía entre 29.527 y 29.884. Este resultado fue consistente con el perfil de optimización agresivo y 30 repeticiones por experimento (ver figura 14).

Figura 14

Optimización de botes totales con SimRunner



La simulación permite evaluar y estudiar el sistema, siendo evidente el proceso critico desempeñado por la cuadrilla del bote 3. Para mejorar su desempeño, se recomienda implementar medidas como:

- Optimizar la logística de carga y descarga mediante rediseño de procesos o asignación de más personal en estas etapas;
- Aumentar su capacidad operativa con ajustes técnicos como ampliación del espacio de carga o mejora del motor; y reducir tiempos muertos mediante análisis detallado de los cuellos de botella en su operación.
- Adicionalmente, la sincronización con los otros botes para equilibrar la carga de trabajo y un mantenimiento preventivo más frecuente para evitar retrasos podrían ser claves para mejorar su eficiencia global.

4.3 Resultados del proyecto P003

Caracterización de la Cadena Agroindustrial del Cacao en el Carmen De Bolívar

El Carmen de Bolívar es un municipio colombiano ubicado en la subregión de los Montes de María, a 114 kilómetros de Cartagena de Indias, con una extensión aproximada de 900 km² y una población estimada de 67.461 habitantes, de los cuales 74% reside en la cabecera urbana y 26% en áreas rurales. Esta localidad cumple un rol estratégico como centro agroindustrial, comercial y cultural del norte del departamento de Bolívar. Su estructura poblacional evidencia una distribución equitativa por sexo y una notable presencia de población afrodescendiente, aunque persisten rezagos significativos en alfabetización: el 23% de la población mayor de 5 años no sabe leer ni escribir, cifra que asciende al 26,6% entre mayores de 15 años. Económicamente, el municipio presenta una base productiva centrada en el sector primario, con cultivos como cacao, aguacate, ñame, maíz y arroz, además de la explotación forestal de teca. En paralelo, cuenta con una creciente actividad industrial particularmente en la transformación de alimentos y una densa red comercial, reflejada en más de 1.300 establecimientos formales. El 55% de sus empresas se clasifican como comerciales, el 29% como prestadoras de servicios y el 15% como industriales. Sin embargo, factores como la informalidad, la fragmentación de la propiedad rural y las secuelas del conflicto armado continúan afectando su capacidad de desarrollo sostenible. Pese a ello, El Carmen continúa posicionándose como un nodo de oportunidad para el impulso de cadenas agroindustriales inclusivas y resilientes, en especial a través del fortalecimiento del cultivo de cacao.

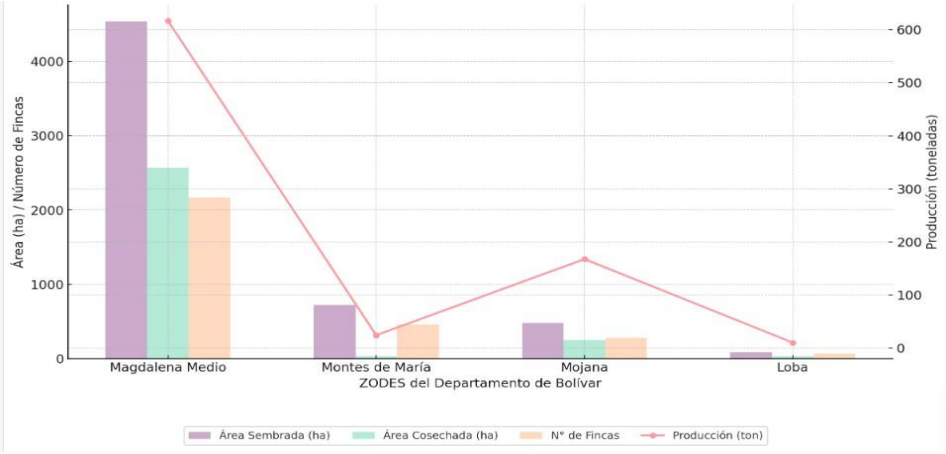
Contexto Regional

En el contexto regional del departamento de Bolívar, la subregión de los Montes de

María de la cual hace parte El Carmen de Bolívar representa una de las zonas con mayor potencial para el desarrollo de la cadena cacaotera, aunque aún ocupa un lugar secundario en términos de producción comparada. Según datos del Balance Tecnológico del Cacao (2010), la ZODES Montes de María contaba con 725 hectáreas sembradas, representando solo el 12,4% del total departamental, con apenas 35 hectáreas efectivamente cosechadas y una producción de 24,5 toneladas, equivalente al 3% de la producción de Bolívar.

Figura 15

Indicadores de producción de la cadena del caco

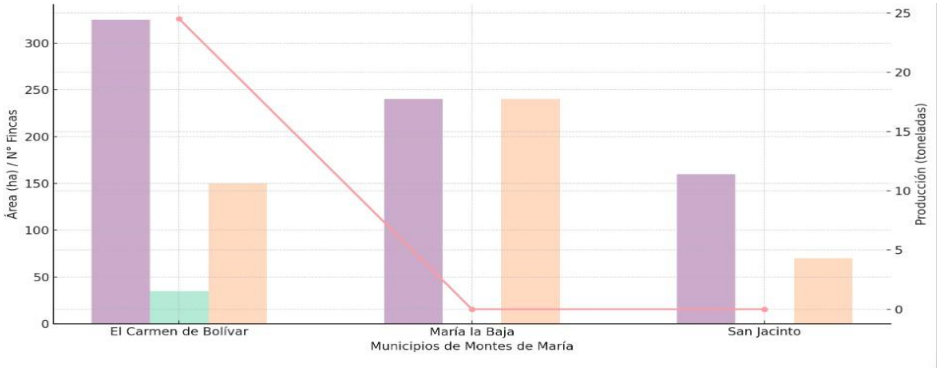


A pesar de su baja participación, la región albergaba 460 fincas productoras, lo que refleja un tejido agrícola activo, con posibilidades de expansión si se fortalecen los encadenamientos productivos. Estos datos sugieren una paradoja: un territorio con vocación agroforestal y diversidad biológica, pero aún rezagado frente a regiones como Magdalena Medio, que concentraba el 75,3% de la producción departamental. Así, El Carmen de Bolívar debe ser entendido como un nodo emergente dentro de la cadena agroindustrial del cacao, con condiciones agroecológicas favorables, pero con claras brechas de productividad, infraestructura y asistencia técnica que exigen intervenciones diferenciadas. El número significativo de fincas activas en la zona indica además un potencial organizativo que puede ser clave en procesos de reconstrucción económica postconflicto y transición hacia sistemas agroindustriales más inclusivos.

La caracterización comparativa del cultivo de cacao en los municipios de Montes de María evidencia profundas asimetrías entre la capacidad productiva instalada y la producción efectiva. El Carmen de Bolívar, con 325 hectáreas sembradas y 150 fincas, fue el único municipio que registró cosecha y producción efectiva en 2009 (35 hectáreas cosechadas y 24,5 toneladas), alcanzando un rendimiento de 0,7 toneladas por hectárea, por encima del promedio departamental (0,36 t/ha). Esta dinámica contrasta notablemente con los municipios de María la Baja y San Jacinto, los cuales, pese a contar con 240 y 160 hectáreas sembradas respectivamente, y un mayor número total de fincas (310 en conjunto), no registraron ninguna actividad de cosecha ni producción en el mismo periodo. Este patrón revela una brecha crítica entre intención productiva y desempeño real, sugiriendo factores subyacentes como abandono de cultivos, baja asistencia técnica, inadecuada articulación comercial o deficiencias en infraestructura postcosecha. La concentración exclusiva de la producción en El Carmen de Bolívar lo posiciona como nodo estratégico para la reactivación y consolidación de la cadena agroindustrial del cacao en la región, pero también subraya la necesidad urgente de intervenciones diferenciadas en los demás municipios. En conjunto, los datos sugieren que, si bien existe una base agrícola significativa en Montes de María, solo una fracción de ese potencial ha sido efectivamente movilizada hacia la producción sostenible y comercialmente viable.

Figura 16

Indicadores del cultivo de cacao en los Montes de María



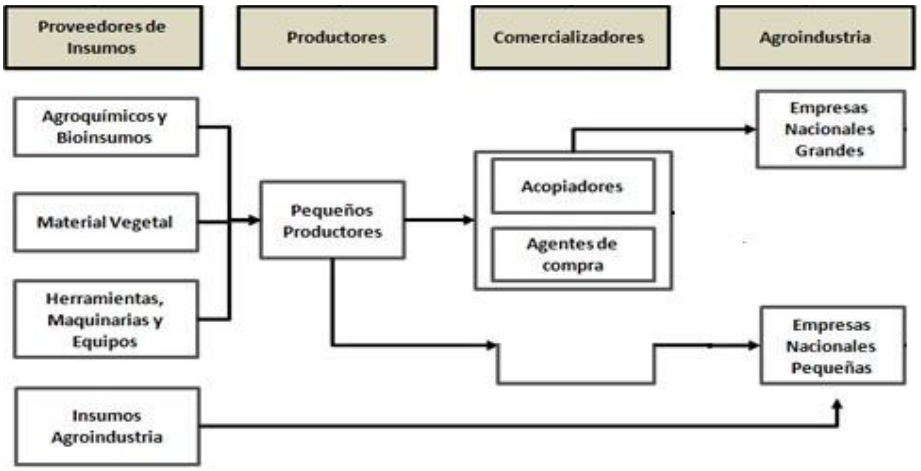
Actores de la Cadena

El diseño funcional de la cadena de suministro agroindustrial del cacao integra múltiples actores en eslabones interdependientes que estructuran el flujo desde la producción primaria hasta la transformación industrial. En su fase inicial, los proveedores de insumos como agroquímicos, bioinsumos, material vegetal y equipos agrícolas abastecen a los pequeños productores, quienes representan el núcleo rural de la cadena. Estos productores movilizan su producción mediante transportistas primarios, que trasladan el grano desde las fincas hasta los centros de acopio locales, donde se realiza una primera etapa de secado, clasificación y trazabilidad básica. Posteriormente, el producto es gestionado por acopiadores y agentes de compra, que actúan como intermediarios entre la producción y el mercado. A partir de allí, el grano es transportado por transportistas nacionales hacia los nodos industriales de transformación. Este flujo culmina en dos destinos: por un lado, las empresas nacionales grandes, que operan bajo modelos estandarizados y tecnología de punta; por otro, las empresas pequeñas, de carácter más flexible, pero con menor capacidad de absorción y transformación.

La articulación entre estos eslabones productores, transportistas, intermediarios y transformadores define la eficiencia global del sistema. Sin embargo, al tratarse de un flujo funcionalmente lineal pero organizativamente fragmentado, se requieren intervenciones integradoras orientadas a fortalecer la trazabilidad, la diferenciación del producto y la distribución equitativa del valor agregado a lo largo de toda la cadena.

Figura 17

Estructura de la cadena del cacao



Productores de cacao

Los productores de cacao en El Carmen de Bolívar constituyen la base primaria de la cadena, con presencia distribuida en 13 veredas del municipio. Operan en unidades productivas de menos de 10 hectáreas, bajo sistemas agrícolas tradicionales, con baja mecanización y escasa incorporación tecnológica. Cultivan principalmente variedades Forastero, Trinitario y Criollo, empleando prácticas de cosecha manual con herramientas básicas. Su producción promedio mensual por finca ronda los 1.000 kg, aunque la variabilidad interanual depende de las lluvias, enfermedades y asistencia técnica. Las fincas cuentan con infraestructura mínima: secado al sol, fermentación rudimentaria y básculas manuales. La trazabilidad es realizada de forma empírica mediante cuadernos de campo y códigos por lote. A pesar del potencial agroecológico del territorio, el acceso a certificaciones, crédito y asistencia técnica formal es limitado. La relación con el centro de acopio es directa, sin contratos, lo que genera dependencia en la fijación de precios y escasa capacidad de negociación colectiva. No obstante, estos productores constituyen un actor estratégico para el fortalecimiento territorial de la cadena, debido a su conocimiento ancestral, cohesión comunitaria y disposición hacia procesos asociativos.

Figura 18

Actores de tipo productor en la cadena del cacao

Transporte Primario

El transporte primario del cacao desde las fincas hacia el centro de acopio se realiza mediante motocicletas individuales de bajo cilindraje (125 cc), operadas por los propios productores o por terceros independientes. Este eslabón logístico es informal, atomizado y sin planificación centralizada. Cada viaje puede movilizar hasta 100 kg de grano, con frecuencia semanal, sujeto a las condiciones climáticas y del estado de las vías rurales, muchas de ellas no pavimentadas. El costo estimado por kilogramo/kilómetro es elevado, alrededor de $650 COP, lo que afecta la rentabilidad del productor y dificulta la economía de escala. Este sistema de transporte carece de trazabilidad formal, protocolos de bioseguridad o estructuras logísticas colectivas, lo que impide garantizar calidad y continuidad operativa. A pesar de su informalidad, este actor cumple un papel crítico como conector funcional entre las unidades productivas dispersas y el nodo central de acopio, representando un punto de apalancamiento clave para intervenciones en logística rural inteligente.

Figura 19

Actores de transportadores primarios en la cadena del cacao

Centro de Acopio Municipal

El centro de acopio ubicado en la cabecera de El Carmen de Bolívar constituye el nodo articulador entre la producción primaria y el mercado. Esta unidad presta servicios esenciales como recepción, secado, fermentación y clasificación básica del grano, con infraestructura funcional aunque limitada: áreas de secado al sol, tanques de fermentación y básculas mecánicas. La trazabilidad se realiza mediante codificación manual por lote, sin integración a sistemas digitales ni herramientas analíticas avanzadas. La relación con los productores es directa, pero no contractual, lo que garantiza flexibilidad pero reduce previsibilidad en la oferta. No existen laboratorios de análisis físico-químico ni sensorial, lo que restringe la posibilidad de validar calidad premium y acceder a mercados especializados. Este nodo, a pesar de sus limitaciones, actúa como columna vertebral del sistema local, dado que canaliza tanto el cacao con destino industrial como el que va a transformadores artesanales. Su fortalecimiento, trazabilidad y aseguramiento de calidad

representa un objetivo estratégico para aumentar el valor agregado regional.

Figura 20

Actor centro de acopio en la cadena del cacao

Empresa Transformadora Industrial (Nacional de Chocolates)

La empresa Nacional de Chocolates, con sede en Barranquilla, es el principal comprador institucional de grano seco proveniente del centro de acopio de El Carmen de Bolívar. Este actor representa el extremo industrial de la cadena, especializado en la transformación a gran escala bajo estándares de calidad homogéneos y procesos automatizados. La relación comercial con el centro de acopio es transaccional, sin contratos de largo plazo ni integración vertical o asociativa. El producto es comprado por lote, sin mecanismos formales de retroalimentación al productor en términos de calidad, precio diferenciado o información de mercado. Si bien la empresa garantiza volúmenes estables de compra, su bajo nivel de articulación con los eslabones anteriores limita el desarrollo territorial de capacidades, la innovación colaborativa y la consolidación de esquemas de comercio justo. No obstante, su posición como líder de mercado representa una oportunidad

para establecer alianzas público-privadas orientadas a mejorar la trazabilidad, la diferenciación del producto y la sostenibilidad del sistema.

Micro y Pequeños Fabricantes Artesanales

Los micro y pequeños fabricantes artesanales de El Carmen de Bolívar operan como actores emergentes de transformación local, generando valor agregado mediante la elaboración de chocolate de mesa, bombones y derivados. Estas unidades, generalmente familiares o asociativas, emplean infraestructura básica, como moldes manuales, molinos mecánicos y cocinas adaptadas, sin procesos de estandarización formal ni certificaciones sanitarias avanzadas. Su producción es estacional y de baja escala, enfocada principalmente en mercados locales y circuitos cortos de comercialización. Compran cacao seco directamente al centro de acopio, sin contratos ni criterios de calidad uniformes, lo que limita la proyección comercial de sus productos. A pesar de estas restricciones, su importancia estratégica radica en su potencial para generar empleo rural no agrícola, dinamizar economías locales y construir identidad

territorial en torno al cacao. Con apoyo técnico, innovación y acceso a canales digitales, estos actores pueden desempeñar un papel clave en procesos de diversificación y democratización del valor dentro de la cadena.

Figura 21

Actor micro empresario en la cadena del cacao

Logística del Transporte y Distribución

La cadena de suministro del cacao en El Carmen de Bolívar presenta una alta dispersión geográfica en su eslabón primario, con fincas distribuidas en múltiples veredas que distan significativamente del centro de acopio municipal. El análisis de trayectos desde 13 veredas revela que las distancias oscilan entre 6,35 km (Arroyo de Arena) y 44,44 km (Chalán), con tiempos estimados de desplazamiento entre 7,6 y 53 minutos, considerando una velocidad promedio de 50 km/h. Esta variabilidad genera una logística rural heterogénea, con efectos directos sobre los costos de transporte, la conservación del grano durante el traslado y la eficiencia operativa de los pequeños productores. Las veredas más alejadas, como Chalán y El Horno, requieren esfuerzos logísticos adicionales que inciden en la rentabilidad del sistema, especialmente en contextos de vías deterioradas o estaciones lluviosas. La dependencia exclusiva de transporte individual en motocicleta agrava la fragmentación, impidiendo la consolidación de rutas compartidas o economías de escala. Esta estructura territorial impone desafíos técnicos significativos para la planificación de acopio, la trazabilidad en tiempo real y la sincronización del flujo logístico, lo cual hace indispensable el diseño de estrategias logísticas diferenciadas por microterritorio.

Tabla 18

Relación de características de veredas productoras

Vereda	Coordenadas	Distancia (km)	Velocidad (km/h)	Tiempo (min)
Tierra Grata	-75.26777, 9.68840	19.34	50	23.20
Arroyo de Arena	-75.16784, 9.73337	6.35	50	7.62
Chalán	-75.31206, 9.54401	44.44	50	53.33
Ojito Seco	-75.28301, 9.73109	21.50	50	25.80
Canzona	-75.26816, 9.74622	18.95	50	22.74
San Isidro	-75.23185, 9.72668	10.35	50	12.42

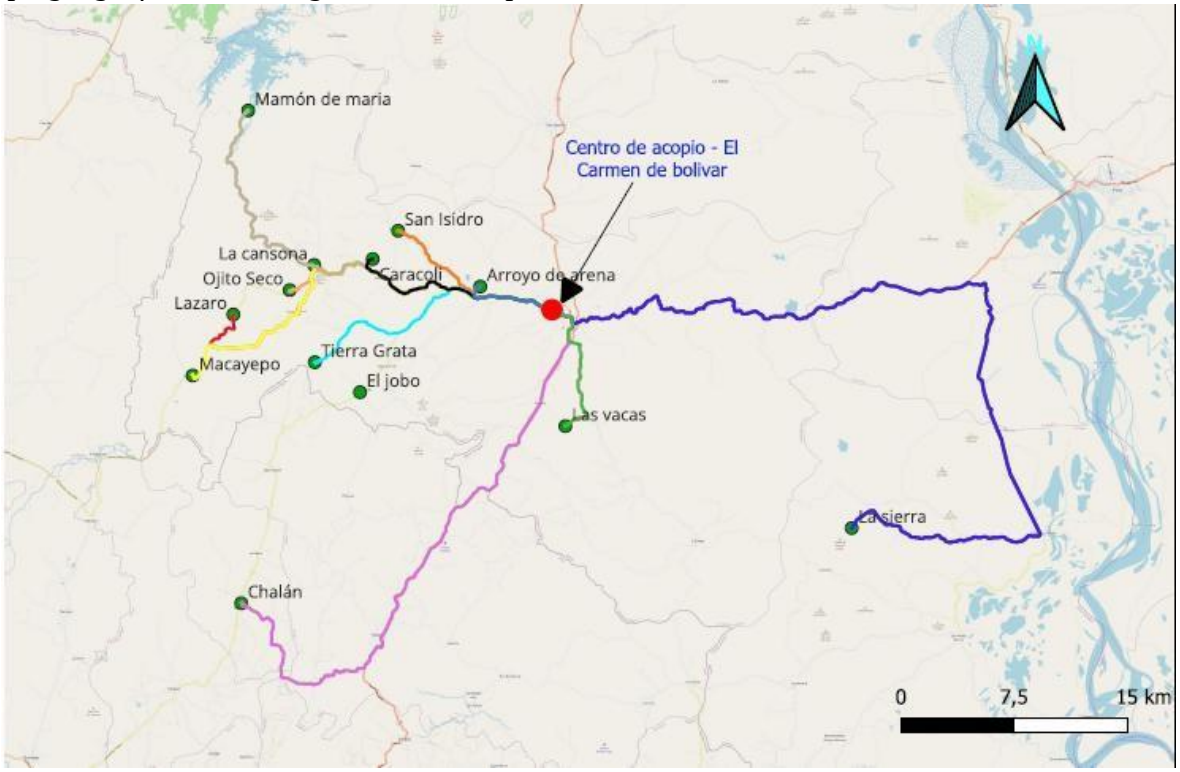
El Horno	-75.37000, 9.51990	40.84	50	49.01
Matuya	-75.22491, 9.66450	14.18	50	17.02
Caracolí	-75.23136, 9.67776	15.76	50	18.91
Bajo Grande	-75.23446, 9.69871	13.25	50	15.90
El Cañito	-75.26239, 9.74768	19.51	50	23.41
El Salado	-75.32378, 9.69536	26.51	50	31.81
Nueva Vida	-75.26762, 9.68530	19.01	50	22.81

.

El mapa de rutas hacia el centro de acopio de cacao en El Carmen de Bolívar revela una estructura territorial marcada por la dispersión de las veredas productoras y la dependencia de un único nodo centralizado para la recepción del grano. Se observan al menos cinco trayectorias principales que conectan zonas clave como Chalán, Tierra Grata, San Isidro, Ojito Seco, Macayepo y Las Vacas, entre otras, con el punto de acopio ubicado en el casco urbano. La red vial muestra una fuerte heterogeneidad en términos de accesibilidad, con veredas próximas como Arroyo de Arena y Caracolí bien comunicadas, mientras que otras como Chalán y La Sierra se ubican en los extremos más distantes, lo que incrementa el tiempo de desplazamiento y los costos operativos por unidad de producto. Esta condición geográfica plantea retos críticos para el diseño de rutas logísticas eficientes, especialmente bajo condiciones climáticas adversas o en temporadas de alta producción. Asimismo, la concentración del acopio en un solo punto genera cuellos de botella y dependencias estructurales que podrían mitigarse mediante una estrategia de acopio satelital o el escalonamiento de entregas por microterritorio. Este análisis espacial evidencia la necesidad de implementar soluciones logísticas diferenciadas que integren la infraestructura vial existente con herramientas de georreferenciación, planificación colaborativa y movilidad rural sostenible.

Tabla 19

Mapa geográfico de red logística de transporte



Problemáticas Identificadas

El diagnóstico aplicado a las 13 veredas productoras de cacao de El Carmen de Bolívar revela una cadena con múltiples limitaciones estructurales, logísticas y comerciales que impactan la eficiencia y sostenibilidad del sistema productivo local. A nivel agronómico, la mayoría de las veredas reporta que las condiciones climáticas afectan significativamente la producción, lo que refleja una alta exposición a la variabilidad ambiental sin mecanismos de adaptación efectiva. Asimismo, se identifica una variabilidad en la calidad del cacao producido, particularmente en Tierra Grata, San Isidro y Ojito Seco, lo cual limita el cumplimiento de estándares exigidos por compradores industriales.

En cuanto a la logística postcosecha, aunque la mayoría de productores afirma no tener limitaciones graves en almacenamiento, sí se reportan pérdidas por mal manejo de almacenamiento en veredas como San Isidro y Tierra Grata. Los costos de producción han

aumentado en todas las veredas, sin que exista un sistema de control o apoyo financiero adaptado al contexto local. Además, se evidencian dificultades crecientes en el cumplimiento de certificaciones ambientales y de calidad, debido a sus altos costos y complejidad administrativa.

Desde el punto de vista comercial, se confirma que las fluctuaciones del precio son una fuente de inestabilidad común, afectando la rentabilidad. Aunque no se identifican grandes problemas para encontrar mercados, sí persisten demoras en los pagos y ausencia de planificación por incertidumbre de la demanda. A esto se suma el acceso limitado a asistencia técnica y financiamiento, así como problemas de formación en buenas prácticas agrícolas y manejo de suelos. En conjunto, el sistema enfrenta debilidades tanto en el nivel de finca como en los mecanismos de articulación comercial, lo que requiere estrategias diferenciadas de intervención territorial.

Tabla 20

Relación de problemáticas identificadas pro veredas

Vereda	Problemas reportados
San Isidro	Afectación climática, pérdida por almacenamiento, fluctuación de precios, dificultad de certificación, acceso limitado a crédito.
Tierra Grata	Afectación climática, variabilidad de calidad, pérdidas por almacenamiento, demanda incierta, cumplimiento ambiental complejo.
Ojito Seco	Afectación climática, dificultad para estándares, acceso técnico limitado, problemas de suelo e insumos.
Chalán	Afectación climática, aumento de costos, dificultad de certificación, problemas de suelo.
Arroyo de Arena	Dificultad en cumplimiento de estándares, demoras en pago, dificultad de certificación, escasa formación técnica.
Caracolí	Pérdidas por almacenamiento, incremento de costos, dificultad en estándares, acceso técnico limitado.
El Horno	Precio inestable, dificultad para certificación, carencia de apoyo técnico.
El Cañito	Variabilidad de calidad, precios fluctuantes, falta de mercado estable, baja formación técnica.
El Salado	Escasa mano de obra, problemas de insumos, dificultad de certificación, baja asistencia técnica.

La Cansona	Pérdidas postcosecha, problemas de certificación, falta de planificación de cosecha.
Las Vacas	Dificultad en acceso a crédito, aumento de costos, normas ambientales costosas, baja formación técnica.
Matuya	Afectación climática, problemas de calidad, acceso a insumos, falta de capacitación.
Nueva Vida	Problemas de certificación, fluctuaciones de precios, dificultades logísticas y baja asistencia técnica.

Estrategias Propuestas

El diagnóstico territorial realizado en las 13 veredas cacaoteras de El Carmen de Bolívar evidencia un sistema productivo fragmentado, condicionado por limitaciones logísticas, baja resiliencia climática, dificultades en certificación, y escasa articulación con el mercado. Frente a este escenario, se propone un conjunto de cinco estrategias integradas que buscan abordar los principales cuellos de botella identificados a lo largo de la cadena de suministro. Estas líneas de acción se estructuran desde un enfoque territorial, multiescalar y participativo, con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa, estabilizar ingresos, y fomentar prácticas sostenibles con base en los recursos y capacidades del entorno. A continuación, se describen en detalle las estrategias propuestas.

- Adaptación climática y resiliencia agronómica

La primera estrategia se enfoca en reducir la vulnerabilidad de los sistemas productivos frente a eventos climáticos adversos, mediante la implementación de prácticas agroecológicas y tecnologías apropiadas. Se plantea la introducción de sistemas agroforestales multiestrato que regulen el microclima y aumenten la biodiversidad funcional, así como la instalación de módulos de secado solar mejorado que reduzcan la pérdida poscosecha por exceso de humedad. Estas acciones se complementan con la adopción de variedades más tolerantes al estrés hídrico, desarrolladas por centros como AGROSAVIA, y con procesos de capacitación técnica para fortalecer la gestión adaptativa en finca. Esta

estrategia es crítica en veredas como Chalán, Tierra Grata y San Isidro, donde la producción ha sido directamente afectada por sequías o lluvias intensas.

- Gestión de calidad y cumplimiento de estándares

Esta estrategia apunta a incrementar el valor del cacao mediante la mejora en la calidad física y sensorial del grano, asegurando su trazabilidad desde origen hasta destino. Se promueve la estandarización de procesos de fermentación y secado con monitoreo de temperatura y pH, junto a la adopción de normativas técnicas nacionales (NTC 1252 y 1253). Además, se plantea la incorporación de sistemas digitales de codificación por lote y trazabilidad comunitaria mediante tecnología móvil. Estas acciones buscan resolver la variabilidad en calidad reportada en veredas como El Cañito, Ojito Seco y Tierra Grata, y facilitar el acceso a mercados diferenciados que exigen cumplimiento con parámetros de inocuidad, homogeneidad y origen certificado.

- Optimización logística y movilidad rural

La tercera estrategia aborda las limitaciones de transporte que afectan la eficiencia del flujo físico desde la finca hasta el centro de acopio. Se propone el diseño de rutas logísticas compartidas y el establecimiento de microcentros de acopio satelital en zonas de difícil acceso. Además, se plantea la entrega de kits modulares de transporte (moto más caja isotérmica) y la integración de herramientas de georreferenciación participativa para el monitoreo y planificación de rutas. Esta línea es prioritaria en veredas periféricas como Chalán, El Horno y Nueva Vida, donde los tiempos de desplazamiento superan los 45 minutos, lo que incrementa significativamente los costos por unidad y afecta la frescura del producto entregado.

- Finanzas rurales y certificación accesible

La cuarta línea estratégica busca democratizar el acceso a mecanismos financieros y certificaciones de calidad, particularmente en contextos de baja escala y limitada liquidez. Se propone la creación de un fondo rotatorio comunitario que permita financiar insumos, prácticas sostenibles y procesos de certificación colectiva. Paralelamente, se promueve la adopción de esquemas de garantía participativa (PGS) con aval local, menos costosos y más inclusivos. También se contempla la implementación de microseguros agrícolas vinculados a condiciones climáticas extremas, como herramienta de mitigación de riesgo. Esta estrategia responde a problemáticas comunes en veredas como El Salado, Las Vacas y Arroyo de Arena, donde los costos y barreras administrativas han impedido el acceso a certificaciones orgánicas o de comercio justo.

- Gobernanza comercial y articulación con mercado

Finalmente, la estrategia de gobernanza y comercialización tiene como objetivo mejorar la capacidad de negociación de los productores y ampliar su inserción en mercados formales. Se promueve la firma de acuerdos marco de compra con empresas transformadoras regionales, el fortalecimiento de asociaciones de productores mediante una mesa técnica de cacao con representación veredal, y el acceso a plataformas de comercio justo, economía solidaria y mercados verdes. Asimismo, se impulsan actividades de promoción territorial como ferias cacaoteras y experiencias de turismo rural con enfoque en el cacao. Esta estrategia es transversal, aplicable a todas las veredas, y constituye la base para reconfigurar las relaciones de poder, flujo de información y distribución del valor agregado en la cadena.

5. CONCLUSIÓN

La aplicación de tecnologías basadas en Industria 4.0, como la simulación y la optimización, permitió desarrollar soluciones efectivas a problemáticas reales en distintos sectores, evidenciando el potencial transformador de estas herramientas en entornos logísticos, productivos y agroindustriales. A través de estos enfoques fue posible analizar procesos sin intervenir directamente en el entorno físico, modelar sistemas complejos y plantear estrategias con sustento técnico. En el proyecto ambiental sobre la Ciénaga Juan Gómez, se identificaron cuellos de botella y se propusieron mejoras para el transporte y descargue de malezas acuáticas, optimizando así la operación fluvial. Por su parte, en la cadena agroindustrial del cacao en El Carmen de Bolívar se caracterizó su estructura territorial y operativa, diagnosticando limitaciones como la dispersión logística, la baja estandarización del grano y la débil articulación comercial, a partir de lo cual se diseñaron cinco estrategias orientadas a mejorar la eficiencia, trazabilidad e inclusión financiera de los pequeños productores. Estos resultados no solo consolidaron una base técnica para formular intervenciones sostenibles, sino que también ofrecieron insumos valiosos para el diseño de políticas públicas más adaptadas a territorios rurales. En el marco de los semilleros de investigación, adquirimos competencias clave como la recolección y análisis de datos, el uso de software de simulación, la formulación de modelos estructurales y la redacción de artículos científicos, al tiempo que fortalecimos habilidades en trabajo colaborativo, comunicación de resultados técnicos y generación de propuestas aplicables al entorno. Estas experiencias, traducidas en ponencias, publicaciones y consultorías, representaron un crecimiento profesional y personal significativo, preparándonos para aportar soluciones concretas desde la ingeniería industrial a desafíos reales del país.

6. BIBLIOGRAFÍA

Proyecto 2023:

Axsäter, S. (2000). *Inventory control*. Kluwer Academic Publishers.

Bernal, C. (2006). *Metodología de la investigación*. Pearson Educación.

Caicedo, A., & Ortiz, V. (2014). Mezcla óptima de producción desde el enfoque gerencial de la contabilidad del throughput: el caso de una pequeña empresa de calzado. *Revista Javeriana*, 15(37), 69–82.

Escobar, J., Linfati, R., & Adarme, J. (2017). Gestión de inventarios para distribuidores de productos perecederos. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 219–239.

Gámez, H., Mejía, C., & León, R. (2017). Diseño de una red de distribución a través de un modelo de optimización considerando agotados. *Ingeniare: Revista chilena de ingeniería*, 25(4), 619–632.

Gutiérrez, V., & Jaramillo, D. (2009). Reseña del software disponible en Colombia para la gestión de inventarios en cadenas de abastecimiento. *Estudios Gerenciales*, 25(110), 125–153.

Gutiérrez, V., & Rodríguez, L. (2008). Diagnóstico regional de gestión de inventarios en la industria de producción y distribución de bienes. *Revista Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad de Antioquia*, 45, 157–171.

Jianfeng, H., Zhao, W., & Wu, X. (2011). Research on the optimization strategy of maintenance spare parts inventory management for petrochemical vehicle. In *International*

Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering (pp. 45–48).

Longenecker, J., Moore, C., & Palich, L. (2010). *Administración de pequeñas empresas*. Cengage Learning.

Mathur, K., & Solow, D. (1996). *Investigación de operaciones: El arte en la toma de decisiones*. Prentice Hall.

Nahmias, S. (2007). *Análisis de la producción y de las operaciones*. McGraw-Hill Interamericana.

Naylor, T., & Kong, C. (1980). *Técnicas de simulación en computadoras*. Limusa.

Ortiz, V., & Caicedo, A. (2012). Optimal production plan in a soft drink bottling plant. *Revista Ingeniería Industrial*, 11(1), 69–82.

Osorio, C. (2013). Modelos para el control de inventarios en las pymes. *Revista Panorama*, 2(6).

Ruiz, V., Suárez, J., Caicedo, E., & Heredia, J. (2017). Aplicación de simulación Montecarlo en un sistema de inventarios. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad del Valle*, 25(2).

Serna, D., & Rivera, Y. (2018). Dinámica de sistemas en la gestión de inventarios. *Ingenierías USBMed*, 9(1), 75–85.

Tsai, W., Lai, C., & Chang, J. (2007). An algorithm for optimizing joint products decision based on the theory of constraints. *International Journal of Production Research*, 45(15), 3421–3437.

Valencia, M., Díaz, F., & Correa, J. (2015). Inventory planning with dynamic demand: A state of art review. *Revista Dyna*, 82(190), 182–191.

Proyecto 2024:

Ashby, W. (1963). *Ross: An introduction to cybernetics*. New York.

Bernal, C. (2006). *Metodología de la investigación*. Pearson.

Byrne, D., & Callaghan, G. (2013). *Complexity theory and the social sciences: The state of the art*. Routledge.

Castellanos, P., & Escott, M. (2020). Evolución de las habilidades laborales en la Industria 4.0 y su impacto financiero. *ITFIP*, 6, 106–119.

Chryssolouris, G., Efthymiou, K., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Pagoropoulos, A. (2013). Flexibility and complexity: Is it a tradeoff? *International Journal of Production Research*, 51(23–24), 6788–6802.

de Rosnay, J. (1977). *Il macroscopio: verso una visione globale* (Vol. 60). Edizioni Dedalo.

Gare, A. (2000). Systems theory and complexity: Introduction.

Garbie, I. H., & Shikdar, A. (2011). Analysis and estimation of complexity level in industrial firms. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 8(2), 175–197.

Klir, G. J. (1985). Complexity: Some general observations. *Systems Research*, 2(2), 131–140.

Prigogine, I. (1977). Nobel Lecture. NobelPrize.org.

Quirk, M. (1999). *Manufacturing, teams, and improvement: The human art of manufacturing*. Prentice-Hall.

Schuh, G. (2013). *Lean innovation*. Springer-Verlag.

Schuh, G. (2014). *Produktkomplexität managen: Strategien-Methoden-Tools*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

Simon, H. A. (1991). The architecture of complexity. In *Facets of systems science* (pp. 457–476). Springer.

Singh, G., Balaji, S., Shah, J. J., Corman, D., Howard, R., Mattikalli, R., & Stuart, D. (2012, August). Evaluation of network measures as complexity metrics. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* (Vol. 45011, pp. 1065–1076). ASME.

Sinha, K., & de Weck, O. L. (2016). Empirical validation of structural complexity metric and complexity management for engineering systems. *Systems Engineering*, 19(3), 193–206.

SMIT, J., Kreutzer, S., Moes, N., & van der Oord, A. (2016). *Industry 4.0*. Directorate General for Internal Policies. European Parliament.

Stacey, R. D., Griffin, D., & Shaw, P. (2000). *Complexity and management: Fad or radical challenge to systems thinking?* Psychology Press.

Stafford Beer (1969). *Cibernética y administración industrial*.

Tamaskar, S., Neema, K., & DeLaurentis, D. (2014). Framework for measuring complexity of aerospace systems. *Research in Engineering Design*, 25(2), 125–137.

Ulrich, H., & Probst, G. J. (1988). *Anleitung zum ganzheitlichen Denken. Ein Brevier für Führungskräfte*. Haupt.

Yates, F. E. (1978). Complexity and the limits to knowledge. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 235(5), R201–R204.

Proyecto 2025:

Aelker, J., Bauernhansl, T., & Ehm, H. (2013). Managing complexity in supply chains: A discussion of current approaches on the example of the semiconductor industry. *Procedia CIRP*, *7*, 79–84.

Aitken, J., & Bozarth, C. (2016). To eliminate or absorb supply chain complexity: A conceptual model and case study. *Supply Chain Management*, *21*, 759–774.

Bernal, C. (2006). *Metodología de la investigación*. Pearson.

Bozarth, C., Warsing, D., Flynn, B., & Flynn, E. (2009). The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance. *Journal of Operations Management*, *27*(1), 78–93.

Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. (2009). Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique. *European Journal of Operational Research*.

Burns, J., & Sivazlian, B. (1978). Dynamic analysis of multi-echelon supply systems. *Computers & Industrial Engineering*.

Cañas, A., Gómez, A., & Vargas, J. (2020). Sustainability in Supply Chain 4.0: A review.

Chandra, C., & Tumanyan, A. (2007). Organization and problem ontology for supply chain information support system. *Data & Knowledge Engineering, 61*, 263–280.

Cheng, C.-Y., Chiu, S.-F., & Wang, Y.-H. (2014). An analysis of the structural complexity of supply chain networks. *Applied Mathematical Modelling, 38*(9–10), 2328–2344.

Chryssolouris, G., Efthymiou, K., Papakostas, N., Mourtzis, D., & Pagoropoulos, A. (2013). Flexibility and Complexity in Manufacturing Systems.

Companys, R. (2005). Gestión de la cadena de suministro.

Dhamija, P., Bag, S., & Pretorius, J. (2020). The role of Industry 4.0 in digital supply chains.

Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*.

Frederico, G., Garza-Reyes, J. A., Kumar, V., & Kumar, A. (2019). Maturity framework for Supply Chain 4.0.

Frizelle, G. (2004). *The Management of Complexity in Supply Chains*.

Lambert, D., Cooper, M., & Pagh, J. (1998). *Supply Chain Management: Processes, Partnerships, Performance*.

Lee, H., & Billington, C. (1993). Material Management in Decentralized Supply Chains. *Operations Research*.

Najjar, M., & Yasin, M. (2021). Managing sustainability in multi-tier supply chains.

Pathak, P., Day, J., Nair, A., Sawaya, W., & Kristal, M. (2007). Complex adaptive systems in supply chains.

Santhi, B., & Muthuswamy, M. (2022). Improving resilience in supply chains using Industry 4.0.

Serdarasan, S. (2013). A review of supply chain complexity drivers. *Computers & Industrial Engineering, 66*, 533–540.

Sobb, J., Sarkar, S., & Koh, L. (2020). Cybersecurity challenges in supply chains 4.0.

Stevens, G. (1989). Integrating the Supply Chain. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*.

Turner, N., Swart, J., Maylor, H., & Zhang, M. (2018). Ambidextrous responses to supply chain complexity.

Vickers, R., & Kodarin, A. (2006). Supply Chain Complexity.

Xiaoxiao, L., & Zikui, H. (2019). Analysis of dynamic complexity in supply chain