

**Diseño de una cadena de suministro con un único producto usando
programación lineal entera**



**Universidad
Tecnológica
de Pereira**

Presentado por

Mariana Arismendi Ramírez

Carlos Arturo Salazar Vargas

Directora

PhD. Eliana Mirledy Toro Ocampo

Universidad Tecnológica de Pereira

Facultad de Ciencias Empresariales

Programa de Ingeniería Industrial

Pereira, julio de 2021

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por encaminarme a través de todos los momentos de mi vida que me permitieron estar dónde estoy y, más importante, ser quién soy.

A mis padres, Luz Aydeé y William, por formarme en los valores del amor y el sacrificio y guiarme en cada paso que di.

A mis hermanos, Jonathan, Andrés, Melissa y Valeria, por su apoyo incondicional, sus consejos y ejemplo que me infundieron todos estos años.

A mi familia, por su entusiasmo y energía que me alentaban cada día a seguir y no desistir.

A nuestra profesora y directora de tesis, Eliana, por haberme formado en la materia y sembrar en mí el amor por esta área del conocimiento en donde realmente amé mi carrera y definí mi enfoque.

A la Universidad Tecnológica de Pereira, docentes y demás personal, por haberme acogido todos estos años e inculcar en mí no solo conocimientos que me hacen profesional, sino valores que me hacen persona.

A todos mis compañeros y amigos con quién tuve la oportunidad de compartir, haya sido un semestre o diez, gracias por ser como fueron.

A mi compañero de trabajo de grado, Carlos, por haber estado a mi lado todos estos años y ser mi pañuelo de lágrimas en los momentos difíciles y mi equilibrio en los momentos de plenitud, por aceptarme como soy y por ser un amigo inalterable desde que coincidimos hasta hoy.

- Mariana A. R.

A Dios, por permitirme culminar esta etapa de mi vida, por no apartarse de mi lado, por mi familia, amigos... por todo.

A mis padres, por cuidarme, guiarme y corregirme a lo largo de estos años, por amarme incondicionalmente y ayudarme a hacer realidad mis sueños, por inspirarme a ser una mejor persona cada día y porque son parte fundamental de mi existencia.

A mi hermana, porque sé que puedo contar con ella en todo momento, por confiar en mí y porque después de mis padres es la persona a la que más admiro y amo en este mundo.

A mi familia y amigos, por apoyarme y esperar siempre lo mejor de mí, por darme fuerzas y recordarme las razones para continuar luchando por mis sueños, y porque de una u otra forma me han ayudado a superar distintos obstáculos en mi vida.

A nuestra directora de tesis, Eliana, por la paciencia que ha tenido al momento de orientarnos, por el tiempo que ha invertido en nuestra formación y porque considero que es una de las mejores docentes con las que afortunadamente he coincidido en mi vida.

A Mariana, porque seguramente no hubiera realizado este trabajo con alguien diferente a ella, porque es una gran amiga y es una fuente (al parecer inagotable) de buena energía.

- Carlos S. V.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	IV
INTRODUCCIÓN.....	1
1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Formulación del problema	3
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.1.1 Objetivos específicos	3
3. JUSTIFICACIÓN	4
4. MARCO REFERENCIAL.....	5
4.1 MARCO TEÓRICO.....	5
4.1.1 Cadena de suministro	5
4.1.1.1 Antecedentes	7
4.1.1.2 Diseño de la cadena de suministro	8
4.1.1.3 Gestión de la cadena de suministro.....	8
4.1.1.4 Colaboración de la cadena de suministro	10
4.1.1.5 Sistemas logísticos de la cadena de suministro.....	11
4.1.1.6 Transporte y tipologías de estrategias de envíos	13
4.1.1.7 La cadena de suministro y la industria 4.0	14
4.1.2 Inventory Routing Problem (IRP)	15
4.2 MARCO CONCEPTUAL.....	26
4.2.1 Logística	26
4.2.2 Vendor Managed Inventory	26
4.2.3 Optimización	26
4.2.3.1 Optimización combinatoria.....	26
4.2.4 Modelos de optimización.....	26
4.2.5 Función objetivo	26
4.2.6 Restricción.....	26
4.2.7 Variables de decisión	26

4.2.8	Métodos y técnicas de optimización.....	26
4.2.8.1	Métodos exactos.....	26
4.2.8.2	Métodos aproximados.....	27
4.2.9	Programación computacional.....	27
4.2.9.1	CPLEX.....	27
4.2.9.2	AMPL.....	27
4.2.9.3	Gap.....	27
5.	DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DEL MODELO.....	28
5.1	Supuestos del modelo.....	28
5.2	Definición de parámetros.....	29
5.3	Definición de variables de decisión.....	29
5.4	Modelo matemático.....	30
5.4.1	Inventory routing problem with stochastic demand (IRPSD).....	31
5.4.2	Demanda estocástica.....	31
5.4.3	Escenarios ($n - 1$).....	32
6.	HIPÓTESIS.....	32
7.	METODOLOGÍA.....	33
7.1	Instancias de prueba.....	33
7.2	Construcción de escenarios y ejecución del modelo.....	34
7.2.1	Fase A.....	34
7.2.2	Fase B.....	35
7.3	Distribución de probabilidad.....	35
8.	RESULTADOS.....	35
8.1	Fase A.....	36
8.2	Fase B.....	60
9.	DISCUSIONES DE LOS RESULTADOS.....	64
10.	CONCLUSIONES.....	65
11.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NRO. 1. Modelo de cadena de suministro	5
FIGURA NRO. 2. Documentos por año de las cadenas de suministro	6
FIGURA NRO. 3. Documentos por área de estudio de las cadenas de suministro	7
FIGURA NRO. 4. Palabras claves relacionadas con la gestión de la cadena de suministro	9
FIGURA NRO. 5. Modelo de depósito de agua.....	11
FIGURA NRO. 6. Cadena de suministro tradicional.....	12
FIGURA NRO. 7. Cadena de suministro con pedido gestionado por el proveedor.....	13
FIGURA NRO. 8. Estrategias básicas que permiten planificar un sistema de distribución.....	13
FIGURA NRO. 9. Documentos por año del problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos	15
FIGURA NRO. 10. Tipo de documentos del problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos	16
FIGURA NRO. 11. Documentos por área de estudio del problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos	16
FIGURA NRO. 12. Palabras claves relacionadas con el control de inventarios	17
FIGURA NRO. 13. Fases del proceso cuantitativo	33
FIGURA NRO. 14. Rutas para abs1n12 en el día 1	62
FIGURA NRO. 15. Rutas para abs1n12 en el día 2.....	62
FIGURA NRO. 16. Rutas para abs1n12 en el día 3.....	62
FIGURA NRO. 17. Rutas para abs1n12 en el día 4.....	62
FIGURA NRO. 18. Rutas para abs1n12 en el día 5.....	63

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA NRO. 1. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 5$	36
TABLA NRO. 2. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 5$	36
TABLA NRO. 3. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 6$	37
TABLA NRO. 4. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 6$	38
TABLA NRO. 5. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 7$	39
TABLA NRO. 6. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 7$	39
TABLA NRO. 7. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 8$	40
TABLA NRO. 8. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 8$	40
TABLA NRO. 9. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 9$	41
TABLA NRO. 10. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 9$	42
TABLA NRO. 11. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 10$	43
TABLA NRO. 12. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 10$	44
TABLA NRO. 13. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 12$	45
TABLA NRO. 14. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 12$	46
TABLA NRO. 15. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 5$	46
TABLA NRO. 16. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 5$	47
TABLA NRO. 17. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 6$	48
TABLA NRO. 18. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 6$	49
TABLA NRO. 19. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 7$	50
TABLA NRO. 20. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 7$	51
TABLA NRO. 21. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 8$	52
TABLA NRO. 22. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 8$	53
TABLA NRO. 23. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 9$	54
TABLA NRO. 24. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 9$	55
TABLA NRO. 25. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 10$	56
TABLA NRO. 26. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 10$	57
TABLA NRO. 27. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 12$	58
TABLA NRO. 28. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 12$	59
TABLA NRO. 29. Resultados de 50 corridas de las instancias de prueba para $t = 3$ y el 5° cliente con demanda estocástica	60
TABLA NRO. 30. Resultados de 50 corridas de las instancias de prueba para $t = 6$ y el 2° cliente con demanda estocástica	61
TABLA NRO. 31. Inventario inicial para $abs1n12$	63
TABLA NRO. 32. Cantidad entregada a los clientes para $abs1n12$	63
TABLA NRO. 33. Inventario final de cada t para $abs1n12$	64

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la globalización y los diversos cambios tecnológicos han contribuido en el desarrollo de la logística y la cadena de suministro, la cual se ha convertido en un todo para el funcionamiento eficiente de todos los involucrados. La correcta gestión de la cadena de suministro ha sido de gran importancia para el desarrollo empresarial, ha pasado de ser una operación más a convertirse en una de las áreas más intensivas en inversión, mano de obra, trabajo en equipo y sobre todo en la utilización de todo tipo de información.

Para Ballou, 2004, la cadena de suministro es un conjunto de actividades funcionales (transporte, control de inventarios, etc.) que se repiten muchas veces a lo largo del canal de flujo, mediante las cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor para el consumidor. La administración de la cadena de suministro está ampliamente relacionada con problemas de control de producción, manejo de inventarios y problemas de transporte, por lo tanto, cuando las diferentes variables y actores que intervienen en la administración de la cadena de suministro trabajan de forma armónica, permiten que las empresas puedan transformar su cadena de suministro en un elemento estratégico diferenciador, y así contribuir en la reducción de costos, disminución en los tiempos de entrega, optimización de los inventarios, mejoras en la rentabilidad y satisfacción del cliente.

La relación que existe entre la administración de la cadena de suministro, los problemas de ruteo de vehículos y los problemas de manejo de inventario es sustancial, por lo tanto, el presente trabajo tiene como principal objetivo identificar diferentes tipologías de la cadena de suministro de acuerdo a sus estrategias de envío, así como diferentes modelos matemáticos para el problema del manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos (IRP, por sus siglas en inglés: Inventory Routing Problem) para diseñar una cadena de suministro mediante programación lineal entera que permita resolver de manera óptima el problema del manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos con un único producto, flota homogénea y demanda conocida.

En este trabajo se implementó un modelo matemático tomado de la literatura y se considera demanda estocástica de forma que se pueda ajustar a escenarios en ambientes reales.

En los capítulos del 1 al 3, se plantea el problema de investigación, los objetivos y la justificación del presente. En el capítulo 4, se abordan las cuestiones teóricas que sustentan el planteamiento del problema. En el capítulo 5, se exponen los supuestos del modelo, así como se definen los parámetros y las variables de decisión de este. En el capítulo 6, se plantea la hipótesis. En el capítulo 7, se especifica la metodología para la solución del modelo y se plantean condiciones iniciales de corrida. En el capítulo 8, presentamos uno a uno los datos de entrada de cada una de las corridas y sus respectivos resultados; así mismo presentamos uno de los casos con todas las matrices de solución arrojadas por el software de optimización y las rutas graficadas. En el capítulo 9, se plantean las discusiones de los resultados. Finalmente, en el capítulo 10, se dan las conclusiones del trabajo.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema

Hoy en día, en un mundo que se encuentra en constante evolución, las empresas deben poseer una alta capacidad de adaptación a los cambios y al desarrollo acelerado de las sociedades para poder ser competitivas, si desean sobrevivir. La logística juega un factor decisivo a la hora de determinar si las empresas son competentes o no.

Dentro de la logística, se han de encontrar aspectos de suma importancia como lo son las cadenas de suministro, en donde productos desde uno o más puntos de origen, son transportados a uno o más puntos de destino, con el objetivo de satisfacer a un cliente final en una cantidad y en un tiempo determinado, optimizando al máximo los recursos utilizados.

Entre las variables que se pueden identificar en este problema, se encuentran las relacionadas con el almacenamiento y de despacho en la flota; estas han de ser elementos cruciales en los sistemas de distribución.

Para la inclusión de la variable ‘inventarios’, se hace necesario de una colaboración proveedor-cliente, mediante la cual sea posible de conocer tanto pronósticos de demanda como niveles de inventario, esto con el fin de que sea posible el diseño de un esquema de asignación del inventario eficiente para clientes y proveedores.

Para resolver de manera sincrónica el problema de asignación simultáneas de rutas (que optimiza la utilización de recursos de transporte) y las decisiones de despacho de mercancías (para minimizar los costos de inventario), uno de los problemas más estudiados es el problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos, ‘Inventory Routing Problem’ (IRP), el cual ha de asignar el inventario a cada cliente y, partiendo de esto, se trazan las rutas que permitan abastecer esta demanda.

Esto último, ha de ser factible toda vez que el modelo IRP se base en el enfoque del inventario administrado por el vendedor, ‘Vendor Managed Inventory’ (VMI), una estrategia de inventarios colaborativos manejados por el vendedor, para el cual la demanda y el inventario han de ser conocidas por los proveedores.

La colaboración de la cadena de suministro, especialmente en el manejo de inventario, resulta ser una táctica que permite la disminución de costos asociados, así como mejorar el nivel de servicio en las operaciones relacionadas. Se puede tratar el problema de inventario y de transporte por separado, pero juntos lograrán un resultado óptimo.

Aquí no hay órdenes de los clientes, la empresa opera con la restricción de que el cliente no se quede sin productos. El IRP no traza una ruta de entrega diaria, si no que determina a qué clientes visitar cada periodo y qué cantidad de producto entregar. Por la alta complejidad computacional que implica resolver este problema de forma exacta, se procura formular un modelo que permita simplificar al máximo el problema, teniendo en cuenta todas las variables antes mencionadas.

1.2 Formulación del problema

¿Cómo implementar un modelo matemático exacto para el diseño de una cadena de suministro de tal forma que pueda ser resuelto en un software de optimización?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Diseñar una cadena de suministro mediante la implementación de un modelo matemático en un software de modelado matemático que permita resolver de manera óptima el problema del manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos con un único producto, flota homogénea y demanda conocida.

2.1.1 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre la cadena de suministro e identificar las diferentes tipologías de ésta, de acuerdo con sus estrategias de envío.
- Realizar una revisión del estado del arte de los diferentes problemas, modelamiento y técnicas de solución empleadas para el problema del manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos.
- Identificar modelos lineales enteros propuestos para el problema del IRP.
- Implementar los modelos del IRP en el software de programación matemática CPLEX, en el lenguaje de programación AMPL.
- Validar el modelo matemático con diferentes casos de prueba y evaluar los resultados obtenidos, así como realizar el análisis de sensibilidad considerando variaciones en la demanda.

3. JUSTIFICACIÓN

Desde el punto de vista empresarial, mantener los costos de todas las operaciones lo más bajo posible es de vital importancia para la organización, actualmente transportar mercancías hacia un cliente final representa un reto enorme, en donde un error logístico puede costarle a la empresa mucho dinero o incluso su posición en el mercado. La cadena de suministro es la columna vertebral de la logística de cualquier empresa, por lo tanto, su correcta gestión es la clave para la eficiencia y el éxito de esta; la realización de este trabajo se justifica claramente por la importancia que tiene la gestión de la cadena de suministro en una organización, para proveer una administración eficiente y mejorar su competitividad en el mercado, lo que se refleja en la calidad del producto y en la minimización de los tiempos y costos asociados al flujo de mercancías.

Este documento tiene como objetivo principal el diseño de una cadena de suministro con un único producto usando programación lineal entera, el cual le permita a una empresa mantener niveles de inventario óptimos, al mismo tiempo que satisfaga la demanda de los clientes. Para lograr nuestros objetivos se acude al empleo un modelo matemático de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos, el cual será adaptado para simular el transporte de un producto por medio de una flota de vehículos homogénea, desde un proveedor que abastece a diferentes clientes que se encuentran esparcidos geográficamente, cuyo objetivo principal es disminuir los costos asociados al transporte del producto a través de las posibles rutas.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

4.1.1 Cadena de suministro

Para Ballou, 2004 la cadena de suministro es un conjunto de actividades funcionales (transporte, control de inventarios, etc.) que se repiten muchas veces a lo largo del canal de flujo, mediante las cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor para el consumidor. Dado que las fuentes de materias primas, las fábricas y los puntos de venta normalmente no están ubicados en los mismos lugares y el canal de flujo representa una secuencia de pasos de manufactura, las actividades de logística se repiten muchas veces antes de que un producto llegue a su lugar de mercado. Incluso entonces, las actividades de logística se repiten una vez más cuando los productos usados se reciclan en el canal de la logística, pero en sentido inverso.

Según los autores Chopra & Meindl, 2013 las cadenas de suministro son todas aquellas partes involucradas de manera directa o indirecta en la satisfacción de una solicitud de un cliente. Ellos explican ciertamente que además de incluir al fabricante y proveedor, también considera a transportistas, almacenistas, vendedores al detalle e incluso a los clientes, un modelo de cadena de suministro como el que se puede observar en la FIGURA NRO. 1.



FIGURA NRO. 1. Modelo de cadena de suministro

Fuente: Tomado de Celis, 2017

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, podemos ver que los últimos autores se refieren a la cadena de suministro como el talento humano involucrado, mientras que el segundo lo define como el conjunto de actividades necesarias para llevar la materia prima a un producto terminado para el consumidor.

En inglés, cadena de suministro se conoce como Supply Chain y se define como el intercambio complejo de información y elementos propios de una organización, como también externos, es decir, con sus proveedores y clientes. Según esto, la cadena de suministro integra ambas partes, talento humano y el conjunto de actividades.

El Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP), es la asociación profesional a nivel mundial por excelencia dedicada a la promoción y difusión de la investigación y el

conocimiento en la gestión de la cadena de suministro, uno de los consejos más importantes a nivel mundial, define a la cadena de suministro de la siguiente manera:

- La Cadena de Suministro eslabona a muchas compañías, iniciando con materias primas no procesadas y terminando con el consumidor final utilizando los productos terminados.
- Todos los proveedores de bienes y servicios y todos los clientes están conectados por la demanda de los consumidores de productos terminados, al igual que los intercambios de materiales y flujos de información en el proceso logístico, incluyendo la adquisición de materias primas hasta la entrega de productos terminados al usuario final.

Para la revisión bibliográfica de la cadena de suministro se realizó una búsqueda de documentos por medio de la base de datos Scopus en título, resumen y palabras claves con las siguientes ecuaciones de búsqueda: "Supply chain" AND "SCM" AND "Inventory"; además se redujo la búsqueda únicamente a artículos.

La consulta arrojó los siguientes resultados:

En la FIGURA NRO. 2, se puede observar un resumen de la cantidad de documentos publicados por año.

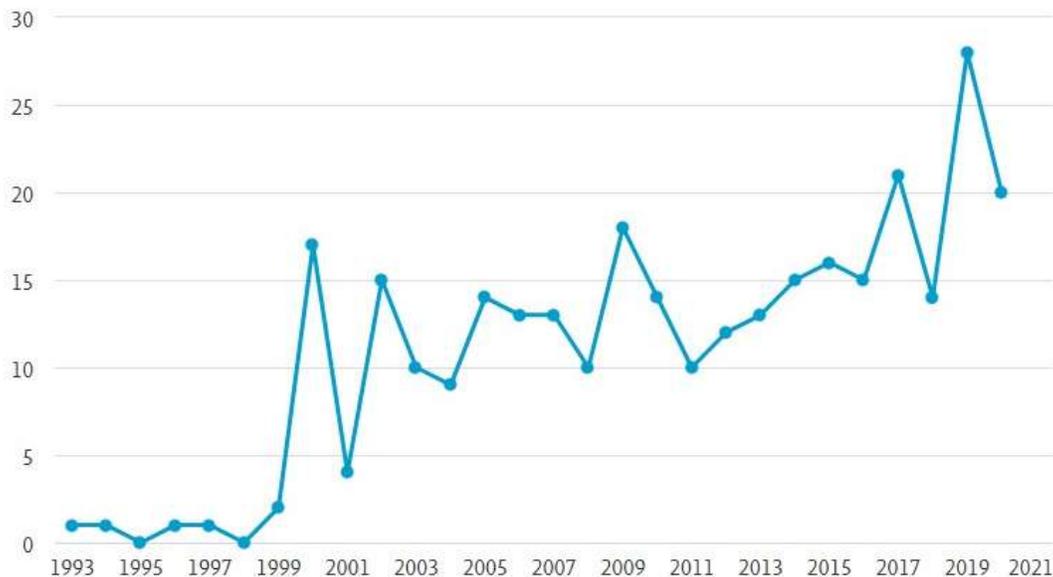


FIGURA NRO. 2. Documentos por año de las cadenas de suministro

Fuente: Tomado de Scopus

Consultado: 30/09/2020

La FIGURA NRO. 3, muestra una gráfica de pastel con los documentos publicados de este tipo, especificando las áreas de enfoque.

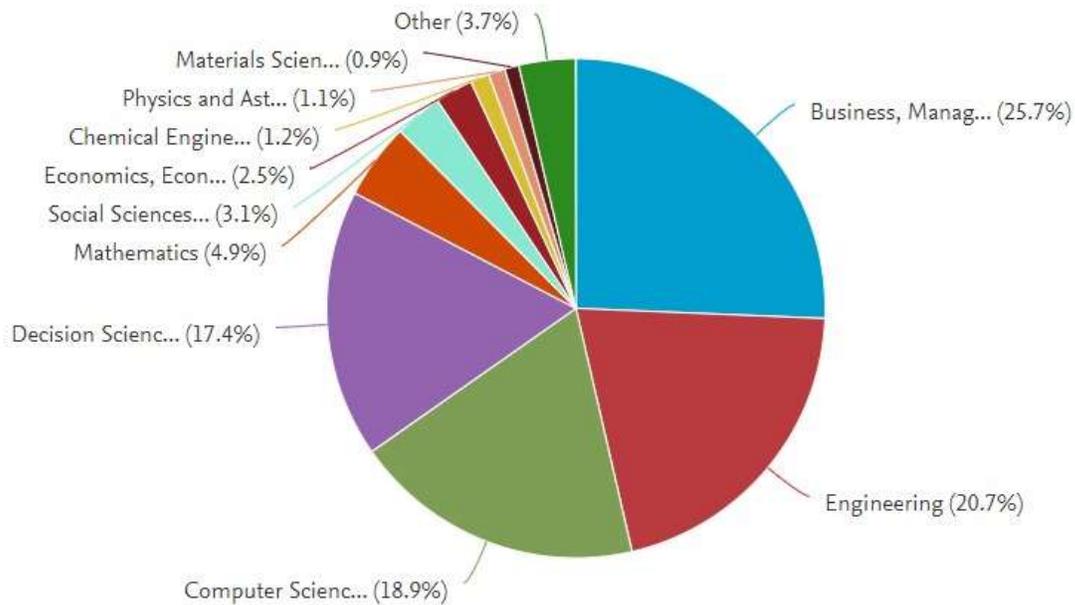


FIGURA NRO. 3. Documentos por área de estudio de las cadenas de suministro

Fuente: Tomado de Scopus

Consultado: 30/09/2020

4.1.1.1 Antecedentes

En Defee et al., 2010 la teoría es necesaria para que una disciplina madure. Esta investigación tiene como objetivo proporcionar un análisis resumido de las teorías que se utilizan en los estudios de logística contemporánea y gestión de la cadena de suministro (SCM).

Estos llevan a cabo una revisión exhaustiva de la literatura de los artículos que aparecen en cinco revistas de logística y SCM de primer nivel con el fin de identificar la frecuencia con la que se utiliza la teoría y clasificar las teorías específicas utilizadas. Se presenta un análisis de las categorías teóricas para explicar el tipo y la frecuencia del uso de la teoría.

Como resultado obtienen que 180 teorías específicas se encontraron dentro de los artículos muestreados. Las teorías agrupadas en las categorías de competitividad y microeconomía representaron más del 40% de las incidencias teóricas. Esto no implica que todos los artículos utilicen la teoría. La investigación encontró que la teoría se utilizó explícitamente en aproximadamente el 53% de los artículos muestreados.

Dos implicaciones son fundamentales. En primer lugar, en la mente de los editores, revisores y autores ¿es suficiente el uso aproximado de 53% de teoría? Indican que la literatura sugiere que sigue habiendo una necesidad de investigación basada en la teoría en la disciplina y que un primer paso puede ser aumentar nuestro uso teórico, y describir claramente la teoría que se está utilizando. Y, en segundo lugar, que la gran mayoría de las teorías utilizadas en la logística reciente y la investigación de SCM se originaron en otras disciplinas. Señalan que el crecimiento de la disciplina dicta la necesidad de un mayor desarrollo de la teoría interna.

Finalmente señalan que a pesar de múltiples llamamientos para el uso de la teoría en la logística y el SCM, se ha producido poca investigación formal examinando las teorías reales que se utilizan. Esta investigación proporciona una revisión y un análisis en profundidad del uso de la teoría en la logística y la investigación de SCM durante el período 2004-2009.

4.1.1.2 Diseño de la cadena de suministro

En Tsao & Lu, 2012 se aborda un problema integrado de ubicación de instalaciones y asignación de inventario teniendo en cuenta los descuentos en los costos de transporte.

En el artículo consideran dos tipos de descuentos de transporte simultáneamente: descuentos de cantidad para el coste de transporte entrante y descuentos de distancia para el coste de transporte saliente. Este estudio utiliza un procedimiento de aproximación para simplificar los detalles del cálculo de distancia y desarrolla un algoritmo para resolver los problemas de gestión de la cadena de suministro (SCM) antes mencionados utilizando técnicas de optimización no lineales. Los estudios numéricos ilustran los procedimientos de solución y los efectos de los parámetros del modelo en las decisiones del SCM y los costos totales.

En Iranmanesh & Kazemi, 2017 tienen como objetivo la optimización bi-objetiva de un solo producto para la red de cadena de suministro de tres capas que consiste en una fábrica, centros de distribución (CEDI) y clientes, incluyendo el impacto del sistema de gestión de inventario. Las decisiones clave de diseño son: la ubicación de los controladores de dominio y su capacidad, la capacidad de producción de la fábrica, la cantidad de producto que se transportará de fábrica a cada CEDI, la cantidad de producto que se transportará de cada CEDI a cada cliente y la cantidad de pedido en los controladores de dominio, con el fin de minimizar la suma de los costos. Los experimentos computacionales demuestran la eficacia del modelo y algoritmo propuestos en el diseño de grandes redes de cadena de suministro.

En Rashid et al., 2018 tratan el problema de ubicación del minorista, cuando se han considerado los costos de inventario para los minoristas y los costos de tiempo de respuesta para los proveedores. Consideran la demanda y el tiempo de servicio como parámetros estocásticos, y la teoría de la cola se ha utilizado para preparar un modelo matemático completo. En este sistema, cada proveedor lo representan con una cola M/M/1 y cada minorista con una cola M/M/1 con llegada masiva. Debido a la complejidad computacional del modelo propuesto, proponen un algoritmo genético (GA) para obtener soluciones aceptables en un tiempo razonable. Los resultados computacionales sugieren que el algoritmo genético propuesto es capaz de resolver el modelo matemático, especialmente para tamaños grandes y mediante un ejemplo real de cadenas de suministro de productos lácteos, confirman la eficiencia del modelo.

4.1.1.3 Gestión de la cadena de suministro

Como se puede apreciar en la FIGURA NRO. 4, la administración de la cadena de suministro está ampliamente relacionada con problemas de control de producción, manejo de inventarios y problemas de transporte, lo que la convierte en tema de estudio muy amplio y complejo.

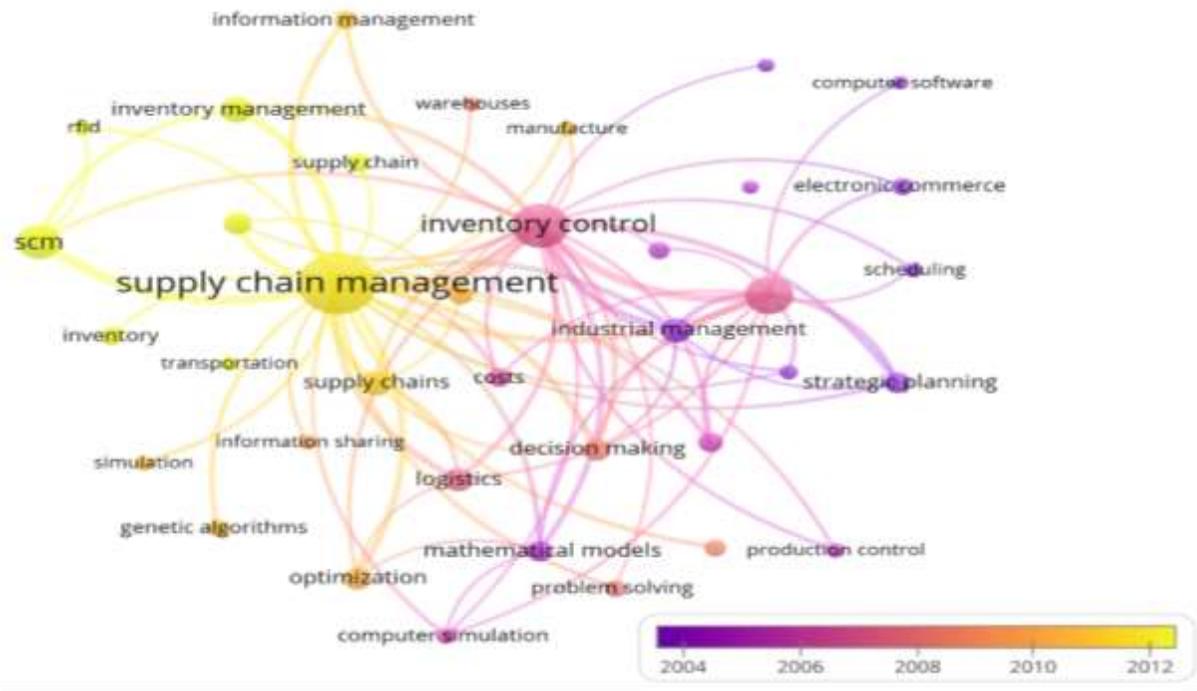


FIGURA NRO. 4. Palabras claves relacionadas con la gestión de la cadena de suministro

Fuente: Tomado de VOSviewer

Consultado: 27/10/2020

En Lee et al., 2006 tratan un modelo integrado que considera la programación de enrutamiento de vehículos y de tránsito directo. Puesto que este problema se conoce como NP-duro, proponen un algoritmo heurístico basado en un algoritmo de búsqueda tabú. En el ejemplo numérico, su algoritmo propuesto encontró una buena solución cuyo error porcentual promedio era inferior al 5% dentro de una cantidad razonable de tiempo.

Según Dondo et al., 2011, el cross-docking es una técnica logística que difiere del almacenamiento porque los productos ya no se almacenan en depósitos intermedios. En su lugar, las instalaciones de tránsito directo consolidan los envíos entrantes en función de las demandas de los clientes y los entregan inmediatamente a sus destinos. Las estrategias híbridas que combinan el envío directo, el almacenamiento y el cross-docking se aplican generalmente en los sistemas de distribución del mundo real. Este trabajo se ocupa de la gestión operativa de redes híbridas de distribución multi-escalón multi-elementos y el objetivo del problema de enrutamiento de vehículos N-escalones con tránsito directo en la gestión de la cadena de suministro (el problema VRPCD-SCM) consiste en satisfacer las demandas de los clientes con un costo de transporte total mínimo.

Según Cao et al., 2013 se encuestan a más de 200 empresas y los resultados muestran que las normas tienden a adoptar sistemas SCM si se ajustan a sus principales procesos de negocio y que hay una externalidad de la red para adaptarse a dichos sistemas. Además, que los beneficios del sistema SCM se amplificarán en la red de la cadena de suministro a medida que aumente el número de usuarios del sistema. Del mismo modo, los problemas del sistema SCM causados por

el inadapto entre el sistema SCM y los principales procesos de negocio serán exacerbados a medida que aumente el número de usuarios en la red.

En Jauhar & Pant, 2016 se ofrece una extensa revisión bibliográfica de la aplicación de GA sobre la gestión de la cadena de suministro (SCM). SCM consta de varios procesos complejos y cada proceso es igualmente importante para mantener una cadena de suministro exitosa. En este documento, se consideran ocho procesos (donde cada proceso tiene un conjunto de subprocesos) según lo dado por el Consejo de Profesionales del SCM (CSCMF). La idea es revisar la aplicación de GA sobre estos aspectos y proporcionar a los lectores un estudio detallado en esta área. Los autores han considerado más de 220 artículos que cubren un lapso de casi dos décadas para este estudio. El análisis se muestra en detalle con la ayuda de gráficos y tablas.

En Xiaoming Li, 2017 proponen un enfoque evolutivo que integra cuatro ventajas rudimentarias: la organización cumple su propio interés, la organización se adapta mejor a su entorno local, la cooperación natural se basa en la reciprocidad directa, y la evolución de la demanda y la oferta proporciona una preservación diferencial de las interrelaciones entre proveedores y compradores. Un juego de noticias de dos etapas ilustra su implicación práctica, que confirma que el enfoque evolutivo es una alternativa legítima al enfoque actual de integración de sistemas para la gestión de la cadena de suministro.

En Kulkarni & Halder, 2020 utilizan un modelo de simulación basado en PERT para calcular el punto de reocupación óptimo y el tamaño de la orden con el objetivo de minimizar el nivel medio de inventario y el tiempo de inactividad debido a la no disponibilidad del material ya que el modelo de cantidad de orden económico convencional (EOQ) utilizado para calcular el punto de pedido en el ciclo de adquisición de material de construcción está fundamentalmente limitado por el plazo constante asumido. En el escenario de construcción real, el plazo de entrega casi nunca es constante.

4.1.1.4 Colaboración de la cadena de suministro

De acuerdo con Pecar & Davies, 2007, el just in time inventory es uno de los métodos tradicionales para reducir la incertidumbre en las empresa pero que una desafortunada consecuencia de este enfoque es el efecto bullwhip y que un enfoque alternativo es alguna forma de escenario colaborativo. Desafortunadamente, ninguno de los dos enfoques garantiza la optimización en toda la cadena de suministro debido al comportamiento racional de los participantes en el proceso. Como es imposible suprimir el comportamiento racional, se busca una solución para este problema a través de la orquestación y la aplicación rigurosa del proceso de Planificación, Previsión y Reabastecimiento Colaborativo (CPFR). Un marco tecnológico que promete facilitar este objetivo es una Arquitectura Orientada a Servicios (SOA) basada en servicios web. Sin embargo, se necesita un nuevo paradigma, más adecuado para escenarios empresariales colaborativos. Pi-calculus, junto con el modelado de procesos de negocio y servicios web, parecen ofrecer una solución. Este documento esboza la dirección de la investigación futura.

También vemos que en Yang & Lin, 2012 desarrollan un modelo de inventario integrado de un solo proveedor para minimizar los costes anuales relevantes totales incurridos por el proveedor

y los compradores, mientras que la distribución de probabilidad de la demanda de plazo de entrega es normal, y se incluye la opción de invertir en la mejora de la calidad del proceso.

4.1.1.5 Sistemas logísticos de la cadena de suministro

En Xiuhui Li & Wang, 2007 proporcionan una revisión de los mecanismos de coordinación de los sistemas de la cadena de suministro en un marco que se basa en la estructura de decisión de la cadena de suministro y la naturaleza de la demanda. Este marco destaca los aspectos conductuales y la necesidad de información en la coordinación de una cadena de suministro.

Por otro lado, en Bose et al., 2008 muestran el caso de una organización china que pasó recientemente por el complejo proceso de integrar los sistemas de ERP y SCM que requería una adquisición y gestión eficientes de hardware, software y recursos humanos para una finalización eficaz. Encuentran que el sistema integrado mejora las operaciones y proporciona un seguimiento y picking eficientes del inventario y varios beneficios tangibles, incluyendo la reducción del plazo de entrega y la precisión mejorada del inventario.

Mediante la clasificación de cuatro arquetipos de la cadena de suministro, Cannella et al., 2010 pretende apoyar a las empresas que deseen comprender la problemática y beneficios no relacionados con su gestión directa, sino debidos a las distintas modalidades de interacción con sus socios/competidores, así como ayudar a clarificar las oportunidades de mejora que las empresas pueden alcanzar mediante mecanismos innovadores de cooperación en el ámbito las TIC.

Para ilustrar los cuatros arquetipos, adoptan el modelo del depósito de agua propuesto por Disney & Towill, 2003. En este modelo se representa una cadena de suministro como un sistema hidráulico en el cual el líquido simboliza los bienes que transitan por la cadena. Las válvulas representan las decisiones que los miembros deben tomar para regular el fluido y lograr el objetivo último de sus actividades: satisfacer la demanda del mercado. Las cisternas simbolizan los inventarios y el fluido contenido representa el nivel de producto almacenado, como se muestra en la FIGURA NRO. 5.

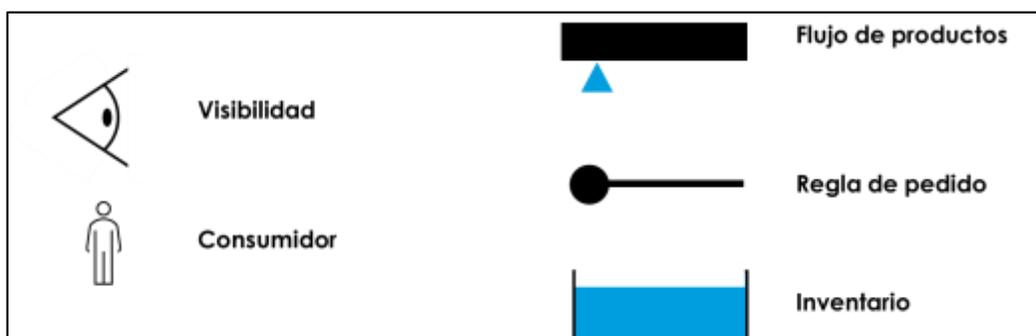


FIGURA NRO. 5. Modelo de depósito de agua

Fuente: Tomado de Cannella et al., 2010

En una cadena de suministro, para satisfacer los pedidos del consumidor, el minorista suministra los productos almacenados, con lo que se produce una disminución en el nivel de su inventario. Para restablecer un nivel de inventario que pueda cumplir con la futura demanda del mercado,

el minorista efectúa un pedido a su proveedor. En la analogía hidráulica este pedido representa la apertura de la válvula entre proveedor y minorista. Como consecuencia del flujo de producto hacia el minorista, el nivel del inventario del proveedor disminuye y se genera la apertura de la válvula entre el proveedor y el miembro aguas arriba. La dinámica válvula-flujo simboliza el proceso orden-entrega, proceso que se repite hasta el productor.

Las diferencias entre los arquetipos presentados en el artículo consisten en las distintas modalidades mediante las cuales los decisores regulan las válvulas en función del nivel de información operacional intercambiada entre los miembros. La decisión acerca del pedido puede ser tomada independientemente por cada miembro de la cadena o conjuntamente entre ellos.

Aquí solo mostraremos la de tipo tradicional y la de tipo VMI, inventario manejado por el proveedor.

- **La cadena de suministro tradicional**

En este caso, las empresas toman decisiones operacionales para maximizar sus objetivos locales y por lo tanto emiten pedidos basándose únicamente sobre su propio nivel de inventario sin considerar la situación de los otros miembros. El proceso de pedido-entrega de productos entre minorista y proveedor se caracteriza por un conjunto de retrasos debidos a los tiempos de producción y de transporte, así como a los eventuales retrasos en el flujo de información, como se muestra en la FIGURA NRO. 6.

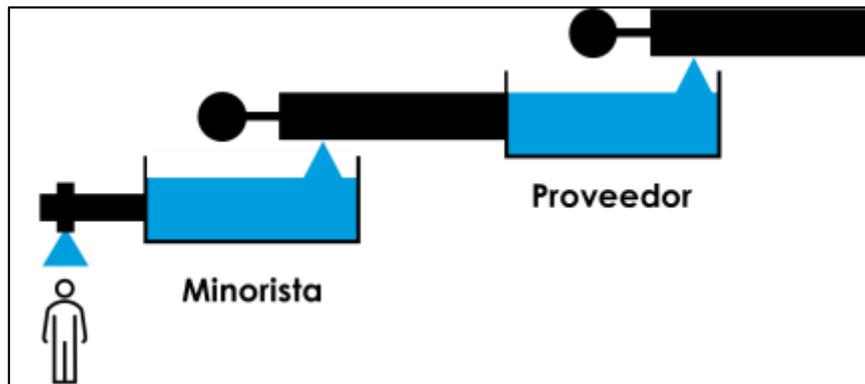


FIGURA NRO. 6. Cadena de suministro tradicional

Fuente: Tomado de Cannella et al., 2010

- **La cadena de suministro ‘con pedido gestionado por el proveedor’**

Las decisiones sobre la cantidad pedida por el minorista están tomadas por el proveedor. La centralización de las decisiones no modifica estructuralmente las reglas de pedido de los miembros con respecto a la cadena de suministro tradicional. Aunque el proveedor tiene acceso a la información sobre el nivel de inventario de los miembros, genera su propio pedido y los pedidos de sus minoristas con la misma lógica de la cadena tradicional, como podemos observar en la FIGURA NRO. 7.

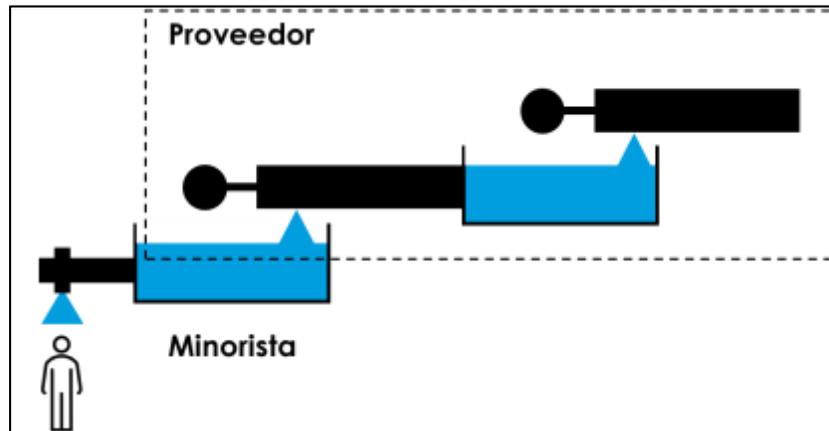


FIGURA NRO. 7. Cadena de suministro con pedido gestionado por el proveedor

Fuente: Tomado de Cannella et al., 2010

4.1.1.6 Transporte y tipologías de estrategias de envíos

Según Estrada, 2007, la demanda de servicio en un territorio influye directamente en las estrategias a seguir para cubrir los puntos de demanda y en consecuencia, la topología de la red de almacenes, centros de consolidación y delegaciones de la empresa logística. La estrategia óptima que aplicar en un sistema de distribución debe responder a un balance de los distintos costes logísticos que actúan: los costes de transporte, costes de inventario (fijos o en tránsito) y costes de manipulación y de amortización asociados a los almacenes y centros de consolidación.

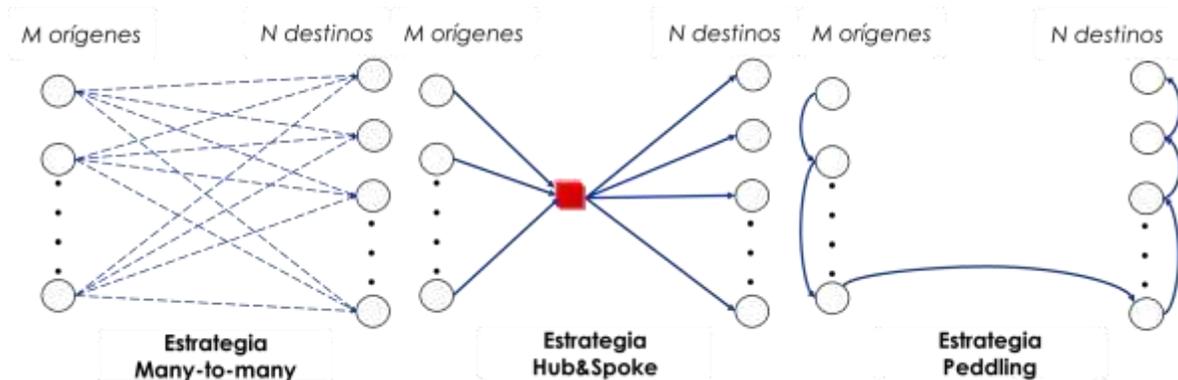


FIGURA NRO. 8. Estrategias básicas que permiten planificar un sistema de distribución

Fuente: Tomado de Estrada, 2007

Con todo, las estrategias básicas cuya combinación permiten planificar un sistema de distribución física se ilustran en la FIGURA NRO. 8. y se resumen en:

a. Envíos directos (Many-to-many): Esta estrategia comporta una distancia a recorrer significativa y un alto número de vehículos para efectuar la distribución, por lo que únicamente se considera cuando los costes de servicio del vehículo F son reducidos, cuando la demanda asociada entre todos los puntos origen-destino puede llenar la capacidad del vehículo o cuando las restricciones temporales sean importantes.

b. Envíos Hub-&Spoke: La construcción de centros de consolidación de carga (hubs) comporta la concentración de la mercancía en estos puntos y la optimización de la capacidad de los vehículos en escenarios con una distribución espacial de demanda no uniforme. Esta estrategia permite incrementar el factor de carga de los vehículos y, en consecuencia, se reduce el coste unitario de transporte a nivel general de toda la red, así como el tiempo total de la distribución.

c. Envíos con paradas múltiples: La aplicación de esta estrategia comporta comparativamente un número reducido de rutas compuestas por un alto número de paradas en cada una de ellas. Su aplicación se puede llevar a cabo cuando el coste y el tiempo para realizar una parada adicional en una ruta es reducido y en escenarios con costes de servicio de vehículo (F) relativamente altos.

4.1.1.7 La cadena de suministro y la industria 4.0

En Gunasekaran & Ngai, 2004 se discuten las experiencias de una empresa de cadena de suministro virtual con referencia a las estrategias, métodos y tecnologías de su cadena de suministro. Indican que esta discusión será útil para otras empresas que tengan la intención de emular algunos de los factores críticos de éxito en la gestión de cadena de suministro virtual.

En Fatorachian & Kazemi, 2020 teniendo en cuenta el papel crucial que desempeña las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) en la consecución de mejoras de rendimiento en los procesos de negocio, tienen como objetivo explorar el impacto potencial de la cuarta revolución industrial: la Industria 4.0 y sus avances tecnológicos asociados en el rendimiento de la cadena de suministro. Este estudio es una investigación exploratoria que intenta explorar el impacto de la Industria 4.0 en el desempeño de la cadena de suministro y conceptualizar y desarrollar los hallazgos en un marco operativo respaldado por la teoría de sistemas.

4.1.2 Inventory Routing Problem (IRP)

Para la elaboración del estado del arte se realizó una búsqueda de documentos por medio de la base de datos Scopus, en título, resumen y palabras claves con las siguientes ecuaciones de búsqueda: “IRP” AND “INVENTORY ROUTING PROBLEM”.

La consulta arrojó los siguientes resultados:

En la FIGURA NRO. 9, podemos observar un resumen de la cantidad de documentos publicados por año.

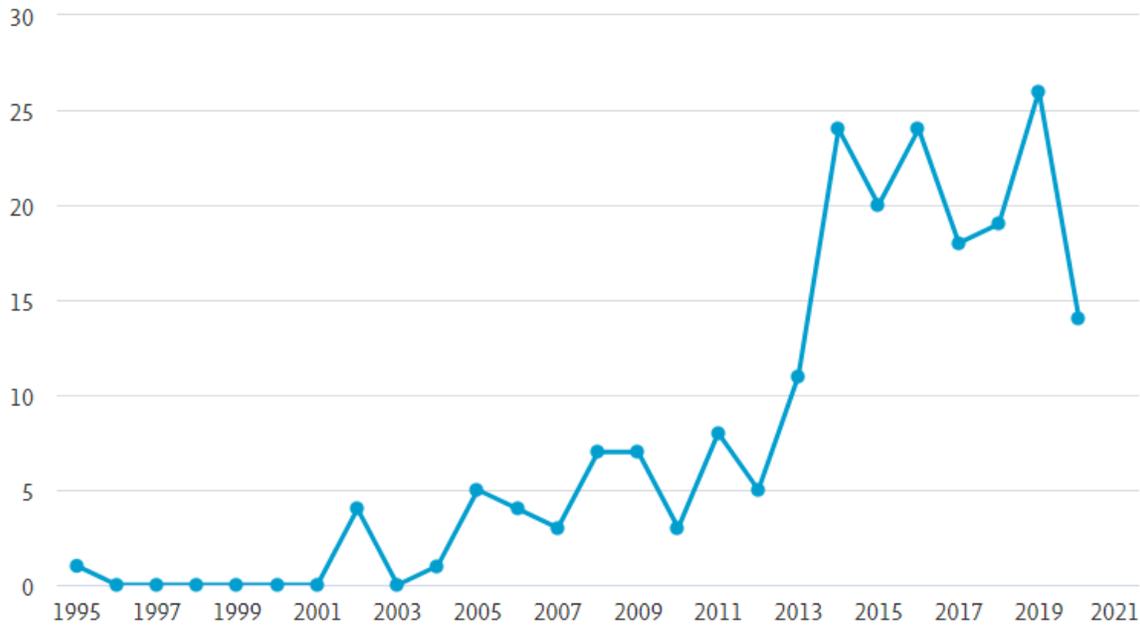


FIGURA NRO. 9. Documentos por año del problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos

Fuente: Tomado de Scopus

Consultado: 30/09/2020

En la FIGURA NRO. 10, se muestra un gráfico de anillos especificando el tipo de documentos de este tema que son publicados.

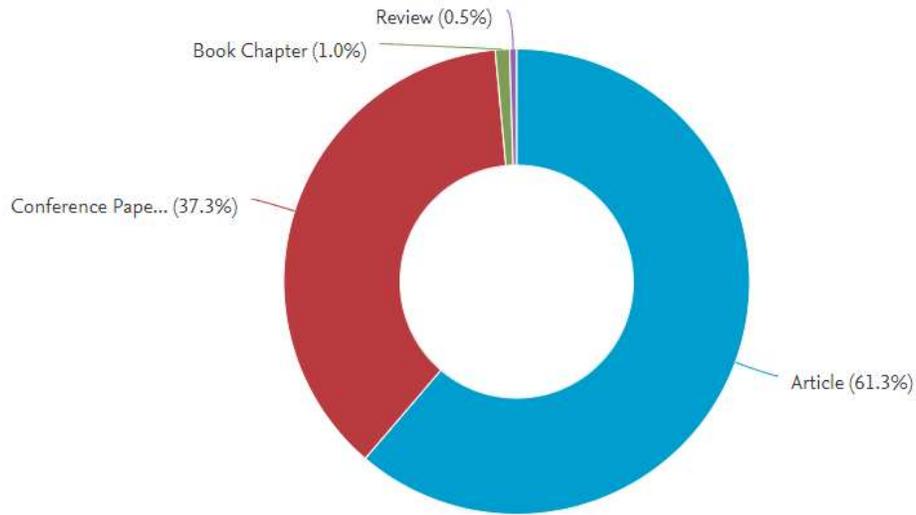


FIGURA NRO. 10. Tipo de documentos del problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos

Fuente: Tomado de Scopus

Consultado: 30/09/2020

En la FIGURA NRO. 11, muestra una gráfica de pastel con los documentos publicados de este tipo, especificando las áreas de enfoque.

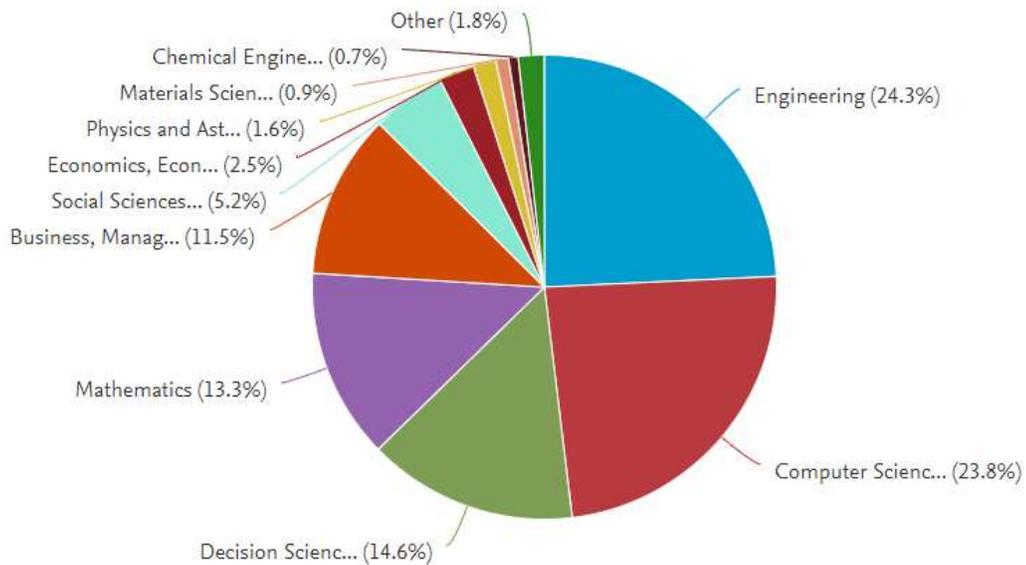


FIGURA NRO. 11. Documentos por área de estudio del problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos

Fuente: Tomado de Scopus

Consultado: 30/09/2020

Como se puede apreciar en la FIGURA NRO. 12, la relación que existe entre el control de inventarios y la administración de la cadena de suministro es alta., son conceptos que generalmente van de la mano, debido a esto, la relación entre el IRP y la SCM es más que evidente, lo que permite abordar ambos problemas de formas similares, buscando mejorar el desempeño logístico de las empresas.

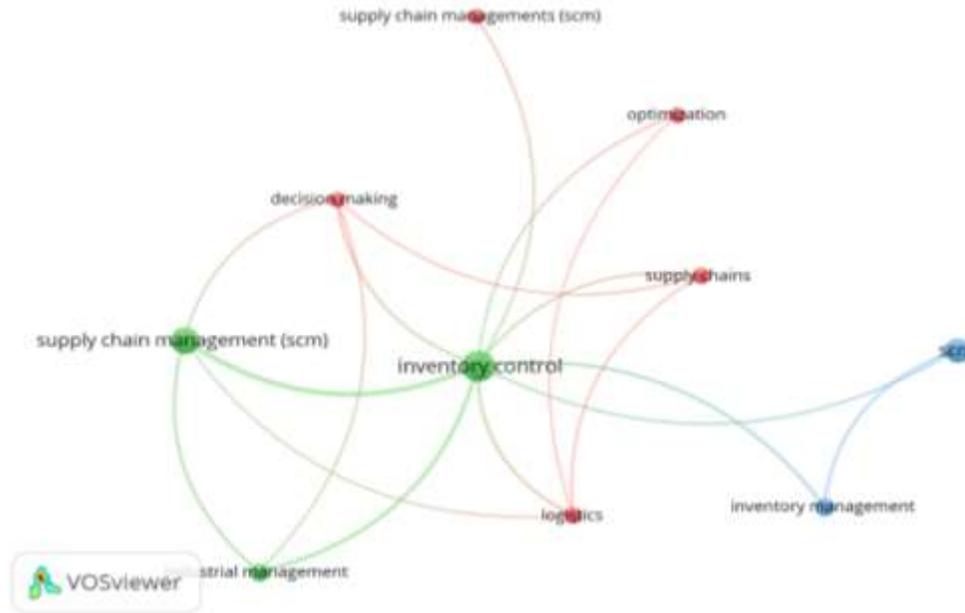


FIGURA NRO. 12. Palabras claves relacionadas con el control de inventarios

Fuente: Tomado de VOSviewer

Consultado: 27/10/2020

Se encontraron 204 documentos publicados entre 1995 y 2020, los cuales en su mayoría son artículos enfocados principalmente a las áreas de ingeniería, ciencias de la computación, matemáticas, administración de empresas, entre otras; posteriormente se realizó una revisión de la literatura para examinar la evolución de los problemas de ruteo de inventarios.

1995

Webb & Larson, 1995 artículo más antiguo encontrado sobre el tema. Una diferencia fundamental entre el SIRP y los IRP tácticos asociados enrutar una flota existente, dado el conocimiento de los niveles reales de inventario del cliente es que todas las posibles realizaciones del problema táctico deben considerarse, al menos implícitamente, al resolver el SIRP. Este artículo generaliza el enfoque de Larson para SIRP mediante el uso del período y la fase de reabastecimiento del cliente como variables de decisión adicionales. Las soluciones de enrutamiento basadas en el período y la fase de reabastecimiento específicos del cliente se desarrollan para un modelo simple de los problemas de enrutamiento táctico que eventualmente encontrará la flota. Las estimaciones del tamaño de la flota requerido las desarrollan sobre la base de estas soluciones de enrutamiento. Las pruebas computacionales muestran que el nuevo

enfoque produce reducciones significativas en el costo de la solución cuando el vehículo es lo suficientemente grande como para reabastecer a varios clientes en un solo viaje y / o cuando existe una variación significativa en los intervalos máximos entre reabastecimiento de los clientes.

2002

Kleywegt et al., 2002 formulan el IRP como un proceso de decisión de Márkov y proponen métodos de aproximación para encontrar buenas soluciones con un esfuerzo computacional razonable. Se presentan resultados computacionales para el IRP con entregas directas.

2005

Campbell & Hardin, 2005 evalúan la complejidad del problema y discuten sus propiedades generales, incluida la descomposición del problema. También presentan un algoritmo que muestran que es óptimo para casos especiales. Finalmente, extienden estos resultados a una versión general del problema.

2006

Aghezzaf et al., 2006 proponen un nuevo modelo para el IRP a largo plazo cuando las tasas de demanda son estables y se utilizan políticas económicas similares a la cantidad de pedidos para administrar los inventarios de los puntos de venta. El modelo propuesto extiende el concepto de rutas en vehículos (recorridos) a recorridos múltiples en vehículos.

En G. Yu et al., 2006 se estudia un problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos de períodos múltiples con entrega dividida, considerando inventario estocástico; se desarrolló un modelo estocástico aproximado y su modelo determinista no lineal equivalente para el problema, además se utiliza la relajación lagrangiana para descomponer el modelo determinista en subproblemas de inventario y subproblemas de enrutamiento. Los resultados numéricos demuestran que este enfoque puede encontrar soluciones de alta calidad para problemas SIRPSD de tamaños realistas en un tiempo de cálculo razonable.

2007

Aziz & Moin, 2007 abordan el problema del tipo muchos a uno, en un horizonte finito, múltiples períodos y múltiples productos, el cual no permite pedidos atrasados. La heurística que utilizan es la de algoritmos genéticos modificados, la cual genera y evalúa conjuntos alternativos de rutas de vehículos, mientras que un programa lineal determina los niveles óptimos de inventario para un conjunto de rutas; esto mediante dos representaciones, una primera simple y, una segunda, que permite al algoritmo aprovechar la compensación entre los costos de transporte y mantenimiento de inventario.

2008

En Y. Yu et al., 2008 se propone un modelo para resolver el IRP en un escenario de entrega dividida y restricción del tamaño de la flota de vehículos; el modelo se resolvió utilizando un método de relajación Lagrangiana combinado con el método del subgradiente sustituto, este enfoque es prometedor para aplicaciones reales.

2009

Bard & Nananukul, 2009 presentan un análisis comparativo de una serie de heurísticas para un IRP que surge en una cadena de suministro de fabricación. Lo formulan como un programa de enteros mixtos con el objetivo de maximizar el beneficio. El inventario se puede acumular en los sitios de los clientes, pero toda la demanda debe satisfacerse sin atrasos. Desarrollan un procedimiento de dos pasos que primero estima las cantidades de entrega diarias y luego resuelve un problema de generación de rutas para vehículos para cada día del horizonte de planificación.

Zheng et al., 2009 presentan un modelo práctico y un enfoque de solución para el problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos cíclico de VMI bajo tasas de demanda de clientes constantes. Proponen, analizan y evalúan un enfoque de solución heurística frente a una heurística comparable.

En Taarit et al., 2009 el objetivo de es determinar el cronograma de entrega y el plan de ruta de la flota de vehículos con el objetivo de minimizar los costos de transporte del producto, basados en una heurística lagrangiana.

2010

Zeng & Zhao, 2010 representan un problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos de demanda estocástica con ventanas de tiempo flexible (IRPSTW) como un modelo de proceso de decisión de Márkov en tiempo discreto y proponen una solución considerando las limitaciones de las ventanas de tiempo suaves. Finalmente, la aplicación de esta solución se ilustra con un ejemplo numérico.

2011

Noor Hasnah Moin, 2011 presenta dos enfoques heurísticos para el problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos en un horizonte finito, un problema de múltiples períodos y un problema de múltiples productos donde las cantidades de recogida no pueden dividirse entre diferentes vehículos. Observan que el algoritmo basado en VNS funciona mejor en problemas más grandes en comparación con el GA.

En Liu & Chen, 2011 desarrollan una heurística eficaz para el problema de precios, manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos. La heurística propuesta toma de decisiones de inventario, rutas y precios simultáneamente; es mejor que otros dos métodos heurísticos que realizan las decisiones de inventario, rutas y precios por separado basadas en el criterio de beneficio medio máximo.

2012

Coelho et al., 2012a presentan una formulación que permite transbordos, para reducir aún más los costos totales, ya sea del proveedor a los clientes o entre clientes. También proponen una heurística adaptativa de búsqueda de vecindario grande para resolver el problema. Esta heurística manipula las rutas de los vehículos mientras que el problema restante de determinar las cantidades de entrega y los movimientos de transbordo se resuelve mediante un algoritmo de flujo de red. Este enfoque puede resolver cuatro variantes diferentes del problema: el IRP y el IRPT, bajo políticas de nivel máximo y de orden hasta nivel.

En Coelho et al., 2012b se desarrolló una metaheurística compuesta por un ALNS mejorada por la solución exacta de dos tipos de MILP; el primero es un modelo de flujo de red utilizado para calcular las cantidades de entrega asociadas con un determinado conjunto de rutas, el segundo proporciona una aproximación del costo de una nueva solución obtenida al aplicar remociones y reinserciones de vértices a una solución dada; además, el algoritmo es suficientemente flexible para manejar el MIRP básico.

2013

Shukla et al., 2013 presentan una metodología basada en un conjunto de algoritmos, unidos con varios procesadores, conocidos como un portafolio de algoritmos, para resolver un problema de optimización complejo como el IRP con demandas estocásticas.

Bertazzi & Speranza, 2013 presentan el problema básico de esta clase, donde solo está disponible un vehículo. Luego, consideran la extensión de este problema al caso de múltiples vehículos.

En Coelho & Laporte, 2013a los autores proponen un algoritmo de solución Branch and Cut para solucionar el problema de ruteo de inventarios en un escenario con múltiples productos y múltiples vehículos, como resultado, encontraron que el algoritmo es simple, poderoso y flexible, lo cual permite que este pueda adaptarse fácilmente variaciones del IRP.

Coelho & Laporte, 2013b desarrollan un algoritmo unificado de Branch-and-Cut para la solución exacta de varias clases de IRP. El algoritmo es capaz de resolver el IRP clásico con uno o varios vehículos, bajo diferentes políticas de inventario y con una flota de vehículos homogénea o heterogénea. También han resuelto instancias con características de flexibilidad y coherencia. La flexibilidad se logra mediante el uso de transbordos; las instancias correspondientes también se resolvieron exactamente por primera vez.

Ramkumar et al., 2013 proponen un enfoque de tres fases llamado CAR, es decir, agrupación de nodos receptores, asignación de cantidades a estos nodos y enrutamiento de vehículos de entrega a través de agrupaciones de nodos. Desarrollan dos heurísticas basadas en este enfoque y los ensayos proporcionan resultados alentadores.

2014

Coelho et al., 2014a proponen diferentes políticas heurísticas para manejar la versión dinámica y estocástica del IRP. Realizan un análisis computacional extenso en instancias generadas aleatoriamente para comparar varias políticas de solución. Entre otras conclusiones, muestran que es posible aprovechar la información estocástica para generar mejores soluciones, a costa de un mayor tiempo de computación.

Coelho & Laporte, 2014 proporcionan una formulación exacta que incluye varias desigualdades válidas conocidas para algunas clases de IRP. Proponen tres nuevas desigualdades válidas basadas en la relación entre la demanda y las capacidades disponibles. Luego, siguiendo una idea propuesta para el agrupamiento binario y para los problemas de programación de trabajos, muestran cómo el orden de los datos de entrada puede tener un efecto importante en la relajación lineal del modelo propuesto para el IRP.

Jayaprakash et al., 2014 presentan un IRP basado en múltiples agentes (MAS). Los agentes se utilizan para representar varias entidades en el problema y cada uno tiene sus propias funciones objetivo local y responsabilidades. También cooperan al mismo tiempo que compiten entre sí por la optimización de recursos. De esta manera, el marco multiagente permite capturar la naturaleza de cooperación y competencia de la optimización global en el IRP y se obtienen los resultados de la simulación en JADE.

N.H. Moin et al., 2014 abordan el IRP con una red de distribución de varios a uno. Proponen dos metaheurísticas de colonia de abejas artificiales (ABC) y algoritmos de búsqueda de dispersión (SS) para resolver el problema.

Vidović et al., 2014 presentan enfoques de solución para el IRP de múltiples productos y períodos múltiples en la entrega de combustible. Proponen un modelo de Programación Entera Mixta (MIP) y un enfoque heurístico con y sin costos de tamaño de flota, para observar el impacto de estos costos en las soluciones que se obtienen. El modelo heurístico se basa en heurísticas constructivas con dos tipos de búsqueda de Variable Neighborhood Descent (VND): una búsqueda local dentro del período y una gran búsqueda de vecindario entre períodos.

Rahim et al., 2014 consideran un problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos de múltiples períodos con tasas de demanda estacionarias estocásticas (MP-SIRP). Lo formulan primero como un programa estocástico lineal de enteros mixtos para el que proponemos un modelo de aproximación equivalente determinista (MP-DAIRP α). Este último modelo se puede descomponer en dos subproblemas: de asignación de inventario y de ruteo de vehículos. El aspecto estocástico de la demanda se tiene en cuenta en el primer subproblema.

Lmariouh et al., 2014 aplican el método de MMIRP, en un contexto VMI, en una empresa marroquí de agua embotellada en la que una planta única entrega un conjunto de depósitos regionales. Consideran el caso en el que todos los destinos se reponen con entregas directas y proponen un programa lineal de enteros mixtos para resolver el problema.

Coelho et al., 2014b realizan una revisión completa de la literatura, categorizando los IRP con respecto a su estructura, variantes y la disponibilidad de información a petición del cliente.

Archetti et al., 2014 presentan y comparan en este artículo distintas formulaciones para IRP, donde la demanda de los clientes debe ser atendida, por vehículos capacitados que arrancan y terminando sus rutas en un depósito; con el objetivo es minimizar la suma de inventario y costos de transporte.

2016

Gede Agus Widyadana et al., 2016 desarrollan un IRP para artículos deteriorables, donde existe la posibilidad de que cada vehículo tenga más de una ruta. El enrutamiento múltiple es adecuado ya que minimiza el tiempo de entrega de cada artículo. Consideran más de un vehículo en el depósito con capacidad máxima similar. Utilizan el método de Optimización de Enjambre de Partículas (PSO) para resolver el problema. Los resultados muestran que el costo total por hora es más sensible a diferentes valores de la tasa de deterioro del inventario que a la tasa de deterioro del transporte.

En Othman et al., 2016 los autores plantean que el algoritmo genético necesita mejorarse en el enfoque de búsqueda de vecindario del algoritmo abeja, ya que bajo ciertas circunstancias el algoritmo genético al llegar al óptimo local, para de mutar y por ende de explorar el espacio de soluciones que puede mejorar la función objetivo del problema.

Qin et al., 2016 investigan el IRP en un sistema de logística de entrega y recolección que consta de un proveedor, un grupo de minoristas y múltiples instalaciones de eliminación. Para minimizar el costo total, primero formulan el IRP y luego desarrollan un método heurístico de dos fases, que consiste en una política de reabastecimiento como la primera fase y un problema de enrutamiento como la segunda fase.

Xiao & Rao, 2016 estudian los problemas de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos en un sistema logístico de dos escalones compuesto por un solo centro de distribución y múltiples clientes para multiproducto en múltiples períodos con restricciones de tiempo bajo las condiciones de la estrategia VMI.

En Desaulniers et al., 2016 proponen un algoritmo Branch-Price-and-Cut, en el cual realizan una adaptación de las desigualdades de capacidad, lo cual da como resultado ser un componente muy eficiente para el algoritmo propuesto, además los autores aseguran que su algoritmo es superior a los que se han planteado con anterioridad para dar solución a problemas de ruteo con más de 3 vehículos.

En Mjirda et al., 2016 sugieren una heurística basada en GVNS para resolver un IRP en un escenario de múltiples productos, se propone una representación de la solución que permite la definición de movimientos entre diferentes períodos de tiempo.

Chitsaz et al., 2016 proponen un algoritmo de dos fases que descompone el problema en dos subproblemas; uno con la naturaleza del enrutamiento y el otro con la programación; para cada subproblema, se desarrolló un nuevo algoritmo heurístico, la fase de enrutamiento se basa en el concepto de descenso más empinado y la programación se basa en la construcción de horarios de vehículos día a día. Luego, el algoritmo mejora la estimación del costo del viaje para la próxima iteración del algoritmo de enrutamiento. Finalmente, para escapar del óptimo local, se utiliza un esquema de ramificación simple.

2017

Hasni et al., 2017 abordan una versión multiproducto del IRP, en la que un proveedor tiene pleno conocimiento de las demandas futuras. Han de desarrollar una búsqueda de vecindario variable para resolver el problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos multiproducto. Posteriormente, se determina una comparación con el algoritmo Branch & Cut. En este algoritmo, el aumentar la duración del horizonte de planificación no impacta negativamente en la calidad general de la solución, lo que si sucede al aumentar el número de vehículos.

Arango & Zapata, 2017 presentan la formulación de un modelo de optimización multiobjetivo, este está compuesto por dos funciones objetivas en las que el costo de transporte y de inventario se optimizan mediante el IRP y el nivel de servicio se optimiza usando el número

de ventanas de tiempo cumplidas para los vehículos en el proceso de enrutamiento y lo resuelven utilizando el Algoritmo Genético de Clasificación No Dominado II (NSGAI).

2018

Archetti et al., 2018 presentan una clase de problemas que integran la generación de rutas para vehículos de recolección y entrega (PDP) y gestión de inventario, y los llaman problemas de ruta de inventario con recolecciones y entregas (IRP-PD). Consideran un problema específico de esta clase, donde una mercancía está disponible en varios orígenes y es demandada por varios destinos. El tiempo es discretizado y el transporte se realiza en un solo vehículo. Proponen un modelo de programación matemática junto con varias clases de desigualdades válidas. Los modelos se resuelven con un método de ramificación y corte.

Avella et al., 2018 presenta reformulaciones del IRP, bajo la política de Reposición de Nivel Máximo, derivadas de una subestructura de período único. Definen una familia genérica de desigualdades válidas y luego presentan dos subclases específicas para las cuales el problema de separación de generar desigualdades violadas se puede resolver de manera efectiva. Implementan un algoritmo básico de Branch-and-Cut para demostrar la fuerza de las reformulaciones de período único.

En Salim et al., 2018 se presenta un algoritmo híbrido que combina el algoritmo genético y la búsqueda de la vecindad variable, el resultado obtenido por medio de este algoritmo es que, al tener casos pequeños, éste logra llegar al óptimo y con instancias grandes el algoritmo proporciona soluciones de buena calidad.

En Lappas et al., 2018 se plantea un enfoque híbrido, para utilizar un algoritmo genético con un algoritmo de recocido simulado para la solución del IRP; el algoritmo genético está relacionado con la fase de planificación para determinar los tiempos y las cantidades de entrega, mientras que el algoritmo de recocido simulado está asociado con la fase de enrutamiento para determinar las rutas de cada individuo de la población. Ambos algoritmos se tratan de forma iterativa para definir una fase de re-optimización.

2019

Thinakaran et al., 2019a abordan el problema basado en un horizonte finito, de múltiples períodos y de un solo producto donde una flota transporta desde el depósito para satisfacer la demanda especificada por los clientes para cada período, sin causar desabastecimientos estos. La cantidad de iteraciones y el tiempo necesario del algoritmo de Greedy es menor comparado con el de búsqueda dispersa y, a pesar de ser de menor calidad que este último, cumple con el objetivo planteado.

Peng et al., 2019 por primera vez, utilizan el algoritmo de evolución diferencial (ED) para optimizar el IRP uno a muchos. En el algoritmo propuesto, que arrojó resultados computacionales prometedores, el método de verificación factible de la solución, el método de búsqueda local y el método de enrutamiento óptimo basado en ED están diseñados para adaptarse a la resolución de IRP.

Jiao & Ravi, 2019 estudian la versión del IRP que asume que las rutas diarias de los vehículos son conexiones directas desde el depósito formando estrellas como soluciones y, llaman a este, el problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos en estrella con la ubicación de las instalaciones (SIRPFL), intentando mantener las pruebas simples.

Kheiri & Zografos, 2019 proponen una extensión multiobjetivo de un problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos (IRP) del mundo real y una generalización del problema clásico de enrutamiento de vehículos (VRP) con el reabastecimiento de inventario administrado por el proveedor (VMI). Este estudio incorpora consideraciones relacionadas con el negocio y de riesgo.

G.A. Widyadana & Irohara, 2019 parten de que los artículos deteriorables no solo se deterioran durante el período de almacenamiento, sino también durante el tiempo de transporte. Desarrollan un IRP con ventanas de tiempo para artículos deteriorables, utilizando la optimización del enjambre de partículas (PSO) para resolver el problema.

Masudin et al., 2019 implementan el método MMIRP (manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos multivehículo y multiproducto, una extensión del IRP) para diseñar las rutas de distribución en una cadena de suministro de GLP de Indonesia. Los problemas los resuelven mediante la programación lineal de enteros mixtos con el software LINGO.

Thinakaran et al., 2019b realizan una revisión sobre el uso de metaheurísticas para optimizar el problema de rutas de inventario (IRP) en tipos homogéneos de vehículos. Estudian y analizan los distintos enfoques desarrollados para resolver el problema en los últimos años. Revisan los distintos tipos de IRP y analizan las posibles opciones para resolverlos y los compara para optimización.

En Zaitseva et al., 2019 proponen dos variaciones del IRP con maximización de beneficios, teniendo en cuenta las diferentes condiciones del mercado y las formas correspondientes de maximizar los beneficios. Los modelos se linealizaron y resolvieron utilizando un solucionador comercial. Resolverlo con maximización de ganancias proporciona decisiones, para cada período de tiempo, con respecto a la cantidad a entregar a cada cliente y las rutas correspondientes para una flota de vehículos. Uno de los modelos brindó la capacidad de fijar precios, para encontrar la combinación óptima de precios y demandas, mientras que otro modelo consideró una tasa de producción ajustable, considerando costos unitarios de producción variables, para aumentar la rentabilidad. Aun así, solo consideraron las consecuencias de introducir la maximización de beneficios en los IRP tanto desde una perspectiva de modelado como desde la perspectiva de estudiar los cambios resultantes en la estructura de las soluciones óptimas. Por lo tanto, solo se resolvieron casos relativamente pequeños.

Cheng & Wang, 2019 tratan de adoptar la evolución diferencial para resolver el problema de la IRP. Mejoran el algoritmo de evolución diferencial para que sea adecuado para resolver problemas de optimización de combinación discreta.

Ramadhan et al., 2019 presentan el esquema de actualización del valor umbral para el TA y la integración entre la búsqueda local y los algoritmos LCI-VCM para TA y RTR. Abordan el IRP de múltiples productos y múltiples períodos. Desarrollan el algoritmo basado

en la aceptación de umbral (TA) y registro a registro (RTR) para resolverlo. Los algoritmos propuestos luego se prueban para resolver el conjunto de datos de la literatura. Se utilizaron algoritmos basados en TA y RTR para mejorar la solución inicial. Los algoritmos TA y RTR produjeron buenos resultados en comparación con los primeros resultados.

En Bertazzi et al., 2019 presentan una metaheurística para la solución del IRP en un escenario de múltiples depósitos, la cual es superior a un algoritmo existente de ramificación y corte con varias familias de cortes. Fue probado también en instancias reales a un gran conjunto de nanos almacenes en Asia, donde demuestra ser eficaz.

2020

En Fokkema et al., 2020 realizan un estudio en el que se considera el problema de transportar biogás desde un conjunto de proveedores descentralizados a una única instalación de procesamiento durante un programa cíclico; logran resolver de manera óptima la combinación de horarios de enrutamiento en tiempo continuo con contenido de inventario continuo en contenedores discretos, el inventario se almacena en contenedores que actúan como unidades de transporte móviles y la capacidad de almacenamiento disponible en cada proveedor.

4.2 MARCO CONCEPTUAL

4.2.1 Logística

Conjunto de todas las operaciones de transporte, almacenamiento y distribución de mercancías que conforman la red de abastecimiento, que permiten que éstas sean entregadas en tiempos y cantidades requeridas por el consumidor final.

4.2.2 Vendor Managed Inventory

Modelo de negocios en el que el proveedor se encarga de gestionar los inventarios del cliente por medio de la información proporcionada por éste acerca de las ventas, históricos e inventarios actuales.

4.2.3 Optimización

Obtención del mejor escenario posible en una situación determinada por medio de la lógica, así como de técnicas analíticas, estadísticas o matemáticas.

4.2.3.1 Optimización combinatoria

Obtención de la mejor solución posible en un espacio de soluciones discreto. Sin embargo, la enumeración de este conjunto resulta muy compleja aún para problemas de tamaño moderado, lo que lo hace computacionalmente muy costoso de resolver.

4.2.4 Modelos de optimización

Representación de un determinado problema en un escenario de la forma más compacta posible, que permita tener una mejor visión del problema y cómo resolverlo de la manera más eficiente.

4.2.5 Función objetivo

Es un modelo que se representa por medio de una ecuación matemática que se optimiza en función de las restricciones del sistema y las variables de decisión.

4.2.6 Restricción

Es una limitación de recursos o capacidades de los elementos involucrados en el modelo de optimización y se representan por medio de ecuaciones e inecuaciones de las variables de decisión.

4.2.7 Variables de decisión

Son incógnitas dentro de la función objetivo de un modelo de optimización que pueden tomar diferentes valores dentro de un conjunto de soluciones acotado por las restricciones del sistema.

4.2.8 Métodos y técnicas de optimización

Herramientas empleadas en la solución de problemas que permiten encontrar soluciones de buena calidad u óptimas.

4.2.8.1 Métodos exactos

Técnicas analíticas o matemáticas que permiten encontrar la mejor solución posible a un problema de optimización.

4.2.8.2 Métodos aproximados

Técnicas analíticas empleadas en la solución de problemas que proporcionan soluciones de buena calidad a un menor costo computacional, cuando estos ocupan mayor tiempo de resolución y la solución solicitada es requerida en poco tiempo.

4.2.9 Programación computacional

Creación de un código fuente que permita solucionar problemas simples y complejos de forma que sea más sencillo interactuar con el código para así determinar el comportamiento del problema bajo distintas variaciones.

4.2.9.1 CPLEX

Formalmente IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, es un paquete de software de optimización matemática que permite resolver problemas de programación de enteros, problemas de programación lineal muy grandes, problemas de programación cuadrática convexa y no convexa y problemas convexos con restricción cuadrática.

4.2.9.2 AMPL

Es un lenguaje de modelado algebraico para describir y resolver problemas de alta complejidad para computación matemática a gran escala del tipo optimización y programación a gran escala, que admite, entre otros, al software CPLEX.

4.2.9.3 Gap

Indica el porcentaje de ramas aún no exploradas del árbol de soluciones en el transcurso y al final de las pruebas.

5. DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DEL MODELO

El problema del IRP consiste en que, dado un proveedor y un conjunto de clientes, debemos determinar cuál será el conjunto de rutas de distribución para cada vehículo, qué vehículos estarán activos qué días, el volumen de producto a enviar a cada cliente, junto con los niveles de inventario que debe de mantener el proveedor para cada periodo de tiempo dentro del horizonte de planificación de tal forma que se minimicen los costos de inventario y de distribución. Nótese que, a diferencia del problema clásico de ruteo de vehículos, la cantidad a enviar a cada cliente es ahora una variable de decisión por lo cual no necesariamente se debe visitar a todos los clientes todos los días, considerando que, los niveles de inventario en las bodegas de los mismos deben ser suficientes para cubrir la demanda para los días que no son atendidos (Saltos & Aceves, 2012).

Adicionalmente del problema en su versión básica, el presente modelo toma en consideración la producción diaria del proveedor, enlazándola con los inventarios de este y las cantidades enviadas a los clientes en cada periodo. La demanda de los clientes está definida para cada periodo y el modelo pretende satisfacerla, manteniendo sus niveles de inventario al final de cada periodo lo más bajo posible, procurando reducir los costos de inventario o dado el caso de que sean productos perecederos o difíciles de almacenar.

Sea $G = (N, E)$ un grafo completo sin dirección, en el que N es el conjunto de ubicaciones (nodos) y E es el conjunto de arcos entre ubicaciones. El nodo 1 es el depósito correspondiente a la ubicación del proveedor y los nodos ≥ 2 corresponden al conjunto de clientes. Un costo m_{ij} se asocia a cada arco (i, j) . Asumimos que los costos M_{ij} satisfacen la desigualdad del triángulo. El horizonte de planificación $T = \{1 \dots H\}$ se compone de H días. Cada cliente $i \in N$ está asociado con una capacidad de inventario C_i y una demanda por periodo D_{it} , $i \in N, j \in T$. La cantidad producida en el depósito en el período t se denota como D_{1t} mientras que I_{it} es el nivel de inventario inicial en la ubicación $i \in N \forall i \in 2, \dots, n$ y O_i corresponde al mismo, para el primer periodo de tiempo. Una flota K de vehículos homogéneos de capacidad V está disponible para distribuir las mercancías desde el depósito a los clientes (Archetti et al., 2019).

5.1 Supuestos del modelo

- Distribución de un único producto, desde un centro de distribución o depósito, a un conjunto de clientes geográficamente dispersos durante un horizonte de planificación determinado.
- La flota de vehículos es de capacidad homogénea y se puede plantear el problema tanto para un solo vehículo, como para varios.
- La demanda tanto del proveedor como de los clientes es conocida. Para el proveedor representa el nivel de producción y para los clientes representa sus ventas, o salidas de inventario, durante el periodo.
- Los costos de mantener el inventario no son tomados en consideración; sin embargo, se pretende mantener los niveles de inventario de los clientes, al final de cada periodo, lo más bajos posibles.
- Al inicio del horizonte de planificación se conoce el nivel de inventario actual del proveedor y de los clientes.

- Los costos de transporte son equivalentes a la distancia entre los nodos y no varían en el tiempo.

5.2 Definición de parámetros

T = Horizonte de planificación.

N = Número de nodos. Donde el nodo $i = 1$, representa al proveedor, así como $i \geq 2$ representa a los clientes.

K = Número de vehículos.

V = Capacidad de los vehículos.

D_{it} = Demanda del nodo i en el periodo t .

C_i = Capacidad de almacenamiento del cliente i .

O_i = Inventario inicial en el nodo i .

M_{ij} = Matriz de costos asociada a cada arco (i, j) .

cx = Coordenadas en x del nodo i .

cy = Coordenadas en y del nodo i .

5.3 Definición de variables de decisión

I_{it} = Inventario del nodo i al inicio del periodo t .

F_{it} = Inventario del nodo i al final del periodo t .

Q_{it}^k = Cantidad entregada al cliente i por el vehículo k en el periodo t .

Y_{ij}^{kt} = Variable binaria que determina si un arco (i, j) es atravesado por un vehículo k en el periodo t .

Z_{it}^k = Variable binaria igual a 1 si un nodo i es visitado por un vehículo k en el periodo t .

A_{kt} = Variable que determina si un vehículo k es utilizado en un periodo t .

U_i = Variable de ayuda para la eliminación de subtours.

5.4 Modelo matemático

El objetivo del problema es minimizar el costo total de la distribución, mientras se satisface la demanda de los clientes, el modelo se formuló de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T C_{ij} Y_{ij}^{kt} \quad (1)$$

s.a

$$O_i = F_{i0} \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$I_{it} = F_{it-1} \quad \forall i \in N, t \in T \quad (3)$$

$$F_{1t} = I_{1t} - D_{1t} + \sum_{j=2}^N \sum_{k=1}^K Q_{jt}^k \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$F_{it} = I_{it} - D_{it} + \sum_{k=1}^K Q_{jt}^k \quad \forall i \in N (i \geq 2), t \in T \quad (5)$$

$$Q_{jt}^k \leq C_j Z_{jt}^k \quad \forall j \in N (j \geq 2), k \in K, t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{j=2}^N Q_{jt}^k \leq V \quad k \in K, t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K Z_{jt}^k \leq 1 \quad \forall j \in N (j \geq 2), t \in T, k \in K \quad (8)$$

$$F_{it} \leq C_i \quad \forall i \in N, t \in T \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_{ij}^{kt} = \sum_{j=1}^N Y_{ji}^{kt} \quad \forall \langle i, j \rangle \in N, k \in K, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_{1j}^{kt} = A_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^N Y_{ji}^{kt} \geq Z_{jt}^k \quad \forall \langle i, j \rangle \in N, k \in K, t \in T \quad (12)$$

$$U_i - U_j \leq V(1 - Y_{ij}^{kt}) - D_{jt} \quad \forall \langle i, j \rangle \in N (j \neq i, j > 1), k \in K, t \in T \quad (13)$$

$$I_{it} \geq 0 \quad \forall i \in N, t \in T \quad (14)$$

$$F_{it} \geq 0 \quad \forall i \in N, t \in T \quad (15)$$

$$Q_{it}^k \geq 0 \quad \forall i \in N, k \in K, t \in T \quad (16)$$

$$Y_{ij}^{kt} \in \{0, 1\} \quad \forall \langle i, j \rangle \in N (i \neq j), k \in K, t \in T \quad (17)$$

$$Z_{it}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, t \in T, k \in K \quad (18)$$

$$A_{kt} \in \{0, 1\} \quad (19)$$

La función objetivo (1), pretende minimizar los costos incurridos por los desplazamientos entre nodos. La restricción (2) define el inventario inicial en el periodo 1, así como (3) define, a partir del segundo periodo de tiempo, al inventario inicial como el equivalente a lo que me quedó del periodo anterior. Para el proveedor, (4) establece su inventario al final de cada periodo como la suma del inventario inicial con la producción del periodo, menos las cantidades enviadas a los clientes. En el caso de los clientes, (5) define el inventario al final del periodo de estos como la suma de lo que les quedó del periodo anterior con las cantidades recibidas por el proveedor, menos las ventas o salidas de inventario. La restricción (6) garantiza que la cantidad entregada en el nodo i sea menor a la capacidad del nodo, así como (7) permite que la cantidad a entregar al cliente i no exceda la capacidad del vehículo. La restricción (8) define que un nodo solo será atendido por un vehículo una única vez en el mismo periodo de tiempo. Por otro lado, (9) asegura que el inventario final no exceda la capacidad del nodo. La restricción (10) garantiza la conexidad de la red, (11) el que las rutas inicien en el proveedor, (12) define que cada vez que se visita un nodo, este será abastecido y (13) evita que se generen subtours en cada periodo t . La restricción (14) impide que se presente desabastecimientos en los clientes y en el proveedor. Finalmente, el conjunto de restricciones (15) – (19) garantizan la integridad y las condiciones de no negatividad en las variables de decisión.

5.4.1 Inventory routing problem with stochastic demand (IRPSD)

Un campo de investigación que no ha tenido suficiente atención en la literatura científica es, en lo relacionado con el IRP, involucrando demandas estocásticas. El IRPSD difiere del IRP en un punto clave como en que en el IRPSD las demandas de los clientes son variables estocásticas donde se conoce únicamente la distribución de probabilidad al momento de realizar la planeación.

5.4.2 Demanda estocástica

Según Goel et al., 2019, el enfoque clásico del ruteo de vehículos en el IRP ha sido la planeación de las rutas bajo ciertos parámetros conocidos con antelación. No obstante, estos modelos de ruteo no representan situaciones cercanas a la realidad, ya que no siempre todos los parámetros se van a conocer previamente. Por ejemplo, los tiempos de desplazamiento debido a la naturaleza incierta del tráfico. Esto dará como resultado que la planeación previa de las rutas no satisfaga las necesidades del cliente en su totalidad y se proporcione un mal servicio.

Así mismo, las consecuencias que puede traer una falta de previsión sobre la demanda estocástica pueden abarcar una serie de costos adicionales que claramente no resultan benéficos para ninguna empresa. Uno de estos tipos de problemas es el “fallo de ruta” que, según Goel et al., 2019, consiste en que un vehículo arribe donde un cliente con existencias insuficientes de mercancía, por lo que no puede satisfacer completamente su demanda. Usualmente la solución es que este vehículo retorne al depósito, reponga mercancía y retome su ruta en el punto donde ocurrió el fallo; sin embargo, esto podría causar un retraso en el tiempo de llegada a los clientes dentro de los horarios establecidos, razón por la que se opta en despachar una mayor cantidad de flota para compensar los fallos; pero de igual forma, esto representaría un costo mayor para la empresa porque, de hecho, se prefiere disminuir la cantidad de vehículos despachados al igual que la cantidad de combustible utilizada.

En este sentido, Goel et al., 2019 observa que las demandas estocásticas siguen un comportamiento dado por una distribución estadística y, según Markov et al., 2018, son usualmente modeladas como variables idénticas e independientes de la distribución normal.

5.4.3 Escenarios ($n - 1$)

Ahora bien, para abordar la forma en que se implementan los escenarios de demanda estocástica para los problemas de localización y ruteo de vehículos, se debe hablar de los escenarios ($n - 1$); estos consisten en que se ha de variar la demanda de uno de los clientes respectivamente, de acuerdo con una serie de números aleatorios que se crean basados en una distribución de probabilidad. Normalmente, el cliente se elige de forma aleatoria. Al tratarse de una optimización estocástica, el dato se cambia para cada corrida y luego de un número suficiente de corridas, se obtiene la variación promedio de la función objetivo. Para el caso de esta investigación se utilizaron los escenarios ($n - 1$) para las instancias de prueba, en donde se realiza la validación de la literatura.

6. HIPÓTESIS

El modelo propuesto para resolver el problema de ruteo de vehículos, combinado con la gestión de inventarios, permite optimizar la gestión de la cadena de suministro de manera más eficiente dado que este permite controlar simultáneamente los niveles de producción, generando ahorros tanto en costos de mantener el inventario en bodega como en despacho de mercancías.

7. METODOLOGÍA

La presente investigación utiliza el método de análisis ya que se descompone en partes e identifica cómo se desarrollará cada objetivo específico, también utilizaremos el método de síntesis porque al final se relacionarán las componentes del problema y se crearán explicaciones a partir de su estudio.

El primer, segundo y tercer objetivo específico se desarrollarán haciendo uso de información contenida en las bases de datos suscritas de la Universidad Tecnológica de Pereira: Scopus, Science Direct, SpringerLink, entre otras, así como las disponibles sin acceso restringido de otras instituciones universitarias y los repositorios académicos abiertos tales como Redalyc y Dialnet.

El cuarto y quinto objetivo específico se desarrollarán teniendo en cuenta la naturaleza matemática de las variables a estudiar en este proyecto por lo cual se plantea hacer uso del enfoque cuantitativo, el cual representa un conjunto de procesos secuencial y probatorio según Hernández Sampieri et al., 2014, por lo cual se deben de seguir las etapas propuestas en la FIGURA NRO. 13.

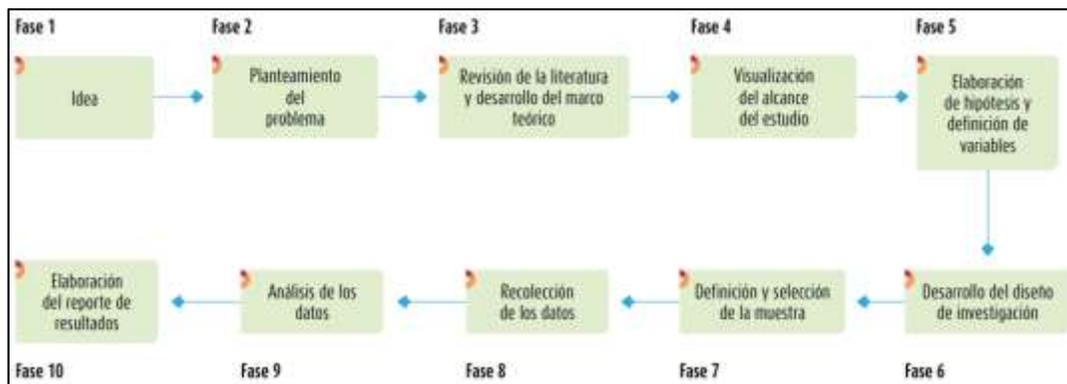


FIGURA NRO. 13. Fases del proceso cuantitativo

Fuente: Tomado de Hernández Sampieri et al., 2014

Por último, hay que mencionar que las fases 7 y 8 no deben de ser consideradas como una definición y selección de muestra y recolección de datos respectivamente, si no que en dichas etapas se realizará el planteamiento del modelo, así como la construcción y revisión de escenarios de prueba para el desarrollo del modelo.

7.1 Instancias de prueba

Se empleará la librería previamente construida del PhD Leandro C. Coelho y Canada Research Chair in Integrated Logistics que se puede encontrar en <https://www.leandro-coelho.com/instances/inventory-routing/>.

Los escenarios empleados fueron tomados con base en el conjunto de instancias propuesto por Archetti et al., 2007 para el problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos con un único vehículo y producto, concretamente:

- abs1n15 – 15 clientes

El tiempo de corrida máximo del modelo, para arrojar una solución, se estableció en 10.000 segundos, un poco menos de 3 horas.

7.2 Construcción de escenarios y ejecución del modelo

El modelo se correrá en tres fases:

7.2.1 Fase A

Dado a que los datos que ofrece esta biblioteca de datos difieren ligeramente de la estructura propuesta en nuestro modelo, se correrá bajo las siguientes condiciones y ajustes:

- i. El número de vehículos se fijó en cuatro (4).
- ii. La capacidad de cada vehículo corresponde a cuatrocientos (400).
- iii. El inventario inicial del proveedor equivale a la mitad de la suma de los inventarios iniciales de los clientes.
- iv. La capacidad de almacenamiento del proveedor se estableció como la suma de las capacidades de los clientes más el veinte por ciento (+20%) para $t = 3$ y más el cincuenta por ciento (+50%) para $t = 6$.
- v. La producción del proveedor se fijó, para un horizonte de planificación $t = 3$, únicamente para el día uno (1), siendo esta equivalente a la suma de la demanda de los clientes en el primer día. Esto viéndolo desde el punto de vista de que la producción establecida para el proveedor corresponde a la disponibilidad de inventario que tendrá para todo el horizonte de planificación (t), más no literalmente a la cantidad de producto elaborado diariamente. Por otro lado, para un $t = 6$, se analizan escenarios con una disponibilidad diaria del proveedor estimada, equivalente al 80% de la suma de las demandas de los clientes cada día.
- vi. A pesar de solo tener los datos para un número de clientes de 15, estos serán los mismos para todos; es decir que, por ejemplo, los datos para 5 clientes serán los primeros cinco datos del archivo,..., para 10 clientes serán los primeros diez datos del archivo y así sucesivamente para todos; por ende, los escenarios a correr para esta primera fase serían:
 - 5 clientes
 - 6 clientes
 - 7 clientes
 - 8 clientes
 - 9 clientes
 - 10 clientes
 - 12 clientes

Se estableció que, bajo nuestro límite de tiempo de corrida establecido (10.000 segundos) y para un horizonte de planificación de $t = 3$, se correrán los escenarios del modelo a partir de 5 clientes siempre y cuando, en los resultados, el gap arrojado sea menor al 30%, ya que los consideramos de buena calidad para su posterior análisis bajo un tiempo de corrida razonable. Para $t = 6$, se correrán los que se hayan corrido para el horizonte de planificación anterior, independientemente del gap arrojado.

7.2.2 Fase B

- i. El número de vehículos se fijó en tres (3).
- ii. La capacidad de cada vehículo corresponde a doscientos (200).
- iii. El inventario inicial del proveedor se debió de modificar debido a que, al alterar la demanda, el modelo arrojó infactible en casos de mayores demandas bajo los parámetros de la fase A, por lo cual ahora equivale a la suma de los inventarios iniciales de los clientes dividido entre 1,4.
- iv. El punto iv. y v. son los mismos que en la fase A.
- v. Se realizará la corrida del modelo con escenarios ($n - 1$) para analizar los resultados del modelo bajo condiciones de demanda estocástica para el quinto y segundo cliente (elegidos de manera aleatoria) y unos horizontes de planificación de 3 y 6 días respectivamente, con un número de 50 corridas para cada uno.

7.3 Distribución de probabilidad

Como se mencionó en el numeral 5.4.3 *Escenarios ($n - 1$)*, cada uno de los escenarios se basa en la modificación de la demanda de un cliente. Según Goel et al., 2019, esta variación se realiza con una serie de números aleatorios generados de acuerdo con una distribución de probabilidad, pues se ha observado que las demandas estocásticas siguen un comportamiento dado por una distribución estadística.

Para esta investigación se utilizará la distribución normal debido a que, como apunta Markov et al., 2018, las demandas estocásticas son usualmente modeladas como variables idénticas e independientes de la distribución normal. Los números aleatorios se generarán a partir de la media y la desviación estándar de los datos de la bibliografía para no afectar en gran medida las soluciones arrojadas por el modelo versus las soluciones obtenidas con anterioridad.

8. RESULTADOS

En las siguientes tablas se presentan los datos de entrada empleados en el modelo y sus respectivos resultados. De la TABLA NRO. 1 a la TABLA NRO. 28 para la fase A; TABLA NRO. 29 y TABLA NRO. 30 para la fase B.

8.1 Fase A

i.

Horizonte de planeación	3	días
# clientes	5	
# vehículos	4	
Capacidad del vehículo	400	unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1			2			3		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	113	95	1	291	0	0						
2	266	433	2	12	12	12						
3	257	469	3	59	59	59						
4	363	330	4	32	32	32						
5	158	453	5	99	99	99						
6	423	238	6	89	89	89						

Capacidad del nodo (i)			Inventario inicial (i,0)		
1	820		1	196	
2	36		2	24	
3	118		3	59	
4	64		4	32	
5	198		5	99	
6	267		6	178	

TABLA NRO. 1. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 5$

z		COSTO			1663				
		Día			1	2	3		
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	196	334	6				
		Producción	291	0	0				
		Despachos	153	328	0				
		Inventario final	334	6	6				
Día	Vehículo	Ruta			1	4	6	1	
1	4	Cantidad entregada				64	89		
Día	Vehículo	Ruta			1	2	3	5	1
2	3	Cantidad entregada				12	118	198	

TABLA NRO. 2. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 5$

ii.

Horizonte de planeación	3	días
# clientes	6	
# vehículos	4	
Capacidad del vehículo	400	unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3
1	113	95	1	330	0	0
2	266	433	2	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39

Capacidad del nodo	Inventario inicial (i,0)
1	960
2	36
3	118
4	64
5	198
6	267
7	117

TABLA NRO. 3. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 6$

z		COSTO	1728				
		Día	1	2	3		
Cadena de suministro	Inventario inicial (proveedor)		235	45	45		
	Producción		330	0	0		
	Despachos		520	0	0		
	Inventario final		45	45	45		
Día	Vehículo	Ruta	1	2	3	5	1
1	2	Cantidad entregada		12	118	198	
		Ruta	1	6	4	7	1
	4	Cantidad entregada		89	64	39	

TABLA NRO. 4. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 6$

iii.

Horizonte de planeación		3	días			
# clientes		7				
# vehículos		4				
Capacidad del vehículo		400	unidades			

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3
1	113	95	1	345	0	0
2	266	433	2	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15

Capacidad del nodo		Inventario inicial (i,0)	
1	996	1	243
2	36	2	24
3	118	3	59
4	64	4	32
5	198	5	99
6	267	6	178
7	117	7	78
8	30	8	15

TABLA NRO. 5. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 7$

z		COSTO	1839					
		Día	1	2	3			
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	243	588	0			
		Producción	345	0	0			
		Despachos	0	588	0			
		Inventario final	588	0	0			
Día	Vehículo							
1	1	Ruta	1	7	4	6	8	1
		Cantidad entregada		39	64	127	30	
2	4	Ruta	1	2	3	5	1	
		Cantidad entregada		12	118	198		

TABLA NRO. 6. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 7$

iv.	Horizonte de planeación	3	días
	# clientes	8	
	# vehículos	4	
	Capacidad del vehículo	400	unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3
1	113	95	1	400	0	0
2	266	433	2	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15
9	332	420	9	55	55	55

Capacidad del nodo		Inventario inicial (i,0)	
1	1128	1	270
2	36	2	24
3	118	3	59
4	64	4	32
5	198	5	99
6	267	6	178
7	117	7	78
8	30	8	15
9	110	9	55

TABLA NRO. 7. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 8$

z	COSTO	1922							
		Día	1	2	3				
Cadena de suministro	Inventario inicial (proveedor)		270	670	0				
	Producción		400	0	0				
	Despachos		0	670	0				
	Inventario final		670	0	0				
Día	Vehículo	Ruta	1	5	3	2	1		
		Cantidad entregada		198	118	12			
2	3	Ruta	1	8	6	4	7	9	1
		Cantidad entregada		30	89	64	49	110	

TABLA NRO. 8. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 8$

v.

Horizonte de planeación	3 días
# clientes	9
# vehículos	4
Capacidad del vehículo	400 unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3
1	113	95	1	421	0	0
2	266	433	2	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15
9	332	420	9	55	55	55
10	388	385	10	21	21	21

Capacidad del nodo		Inventario inicial (i,0)	
1	1178	1	281
2	36	2	24
3	118	3	59
4	64	4	32
5	198	5	99
6	267	6	178
7	117	7	78
8	30	8	15
9	110	9	55
10	42	10	21

TABLA NRO. 9. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 9$

z		COSTO	1957	relmipgap 0.259931					
		Día	1	2	3				
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	281	374	0				
		Producción	421	0	0				
		Despachos	328	374	0				
		Inventario final	374	0	0				
Día	Vehículo	Ruta	1	2	3	5	1		
1	2	Cantidad entregada		12	118	198			
2	1	Ruta	1	9	10	7	4	6	8
		Cantidad entregada		110	42	39	64	89	30

TABLA NRO. 10. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 9$

vi.

Horizonte de planeación	3	días
# clientes	10	
# vehículos	4	
Capacidad del vehículo	400	unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3
1	113	95	1	513	0	0
2	266	433	2	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15
9	332	420	9	55	55	55
10	388	385	10	21	21	21
11	188	69	11	92	92	92

Capacidad del nodo		Inventario inicial (i,0)	
1	1510	1	373
2	36	2	24
3	118	3	59
4	64	4	32
5	198	5	99
6	267	6	178
7	117	7	78
8	30	8	15
9	110	9	55
10	42	10	21
11	276	11	184

TABLA NRO. 11. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 10$

z		COSTO	2055	relmipgap 0.28206							
		Día	1	2	3						
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	373	486	92						
		Producción	513	0	0						
		Despachos	400	394	0						
		Inventario final	486	92	92						
Día	Vehículo										
1	1	Ruta	1	9	10	7	4	6	11	8	1
		Cantidad entregada		110	42	39	64	89	26	30	
2	1	Ruta	1	5	3	2	11	1			
		Cantidad entregada		198	118	12	66				

TABLA NRO. 12. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 10$

vii.

Horizonte de planeación	3 días
# clientes	12
# vehículos	4
Capacidad del vehículo	400 unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3
1	113	95	1	584	0	0
2	266	433	2	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15
9	332	420	9	55	55	55
10	388	385	10	21	21	21
11	188	69	11	92	92	92
12	374	148	12	51	51	51
13	296	322	13	20	20	20

Capacidad del nodo	Inventario inicial (i,0)
1	1741
2	36
3	118
4	64
5	198
6	267
7	117
8	30
9	110
10	42
11	276
12	153
13	40

TABLA NRO. 13. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 3$ y $n = 12$

z		COSTO	2169		relmipgap = 0.37508				
		Día	1	2	3				
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	434	133	133				
		Producción	584	0	0				
		Despachos	885	0	0				
		Inventario final	133	133	133				
Día	Vehículo								
1	2	Ruta	1	13	2	3	5	1	
		Cantidad entregada		40	12	118	198		
	3	Ruta	1	8	11	1			
		Cantidad entregada		30	92				
	4	Ruta	1	12	6	4	7	10	9
		Cantidad entregada		51	89	64	39	42	110

TABLA NRO. 14. Resultados de la instancia de prueba para $t = 3$ y $n = 12$

viii.

Horizonte de planeación	6 días
# clientes	5
# vehículos	4
Capacidad del vehículo	400 unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3	4	5	6
1	113	95	1	233	233	233	233	233	233
2	266	433	2	12	12	12	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89	89	89	89

Capacidad del nodo		Inventario inicial (i,0)
1	1025	1
2	36	2
3	118	3
4	64	4
5	198	5
6	267	6

TABLA NRO. 15. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 5$

z		COSTO	3728	relmipgap 0.159388				
		Día	1	2	3	4	5	6
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	196	29	262	257	90	7
		Producción	233	233	233	233	233	233
		Despachos	400	0	238	400	316	0
		Inventario final	29	262	257	90	7	240
Día	Vehículo	Ruta	1	5	3	2	4	1
1	1	Cantidad entregada		198	118	24	60	
3	4	Ruta	1	4	6	1		
		Cantidad entregada		64	174			
4	1	Ruta	1	5	3	2	4	6
		Cantidad entregada		99	59	24	36	182
5	4	Ruta	1	5	3	1		
		Cantidad entregada		198	118			

TABLA NRO. 16. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 5$

ix.

Horizonte de planeación	6	días
# clientes	6	
# vehículos	4	
Capacidad del vehículo	400	unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3	4	5	6
1	113	95	1	264	264	264	264	264	264
2	266	433	2	12	12	12	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39	39	39	39

Capacidad del nodo	Inventario inicial (i,0)		
1	960	1	235
2	36	2	24
3	118	3	59
4	64	4	32
5	198	5	99
6	267	6	178
7	117	7	78

TABLA NRO. 17. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 6$

z		COSTO	3806	relmipgap 0.431538					
		Día	1	2	3	4	5	6	
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	235	499	35	299	163	45	
		Producción	264	264	264	264	264	264	
		Despachos	0	728	0	400	382	0	
		Inventario final	499	35	299	163	45	309	
Día	Vehículo	Ruta	1	6	4	7	1		
2	1	Cantidad entregada		219	64	117			
		Ruta	1	2	3	5	1		
4	4	Cantidad entregada		12	118	198			
		Ruta	1	4	2	3	5	1	
4	2	Cantidad entregada		64	36	118	182		
		Ruta	1	6	4	7	3	5	1
5	2	Cantidad entregada		137	32	39	59	115	
		Ruta	1	6	4	7	3	5	1

TABLA NRO. 18. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 6$

x.

Horizonte de planeación	6	días
# clientes	7	
# vehículos	4	
Capacidad del vehículo	400	unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3	4	5	6
1	113	95	1	276	276	276	276	276	276
2	266	433	2	12	12	12	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15	15	15	15

Capacidad del nodo		Inventario inicial (i,0)	
1	996	1	243
2	36	2	24
3	118	3	59
4	64	4	32
5	198	5	99
6	267	6	178
7	117	7	78
8	30	8	15

TABLA NRO. 19. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 7$

z		COSTO	4276	relmipgap 0.326725						
		Día	1	2	3	4	5	6		
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	243	134	410	286	162	38		
		Producción	276	276	276	276	276	276		
		Despachos	385	0	400	400	400	0		
		Inventario final	134	410	286	162	38	314		
Día	Vehículo	Ruta	1	8	6	4	2	3	5	1
1	4	Cantidad entregada		30	89	64	24	59	119	
3	4	Ruta	1	7	3	5	1			
		Cantidad entregada		102	118	180				
4	3	Ruta	1	8	6	4	7	1		
		Cantidad entregada		15	267	64	54			
5	1	Ruta	1	8	4	2	3	5	1	
		Cantidad entregada		30	32	24	118	196		

TABLA NRO. 20. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 7$

xi.

Horizonte de planeación	6 días
# clientes	8
# vehículos	4
Capacidad del vehículo	400 unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3	4	5	6
1	113	95	1	320	320	320	320	320	320
2	266	433	2	12	12	12	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15	15	15	15
9	332	420	9	55	55	55	55	55	55

Capacidad del nodo		Inventario inicial (i,0)	
1	1128	1	270
2	36	2	24
3	118	3	59
4	64	4	32
5	198	5	99
6	267	6	178
7	117	7	78
8	30	8	15
9	110	9	55

TABLA NRO. 21. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 8$

z		COSTO	5352	relmipgap 0.529725						
		Día	1	2	3	4	5	6		
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	270	190	510	154	74	10		
		Producción	320	320	320	320	320	320		
		Despachos	400	0	676	400	384	0		
		Inventario final	190	510	154	74	10	330		
Día	Vehículo	Ruta	1	4	9	2	5	3	8	1
1	1	Cantidad entregada		64	110	24	99	73	30	
3	1	Ruta	1	5	3	7	1			
		Cantidad entregada		198	118	78				
3	3	Ruta	1	6	8	1				
		Cantidad entregada		267	15					
4	2	Ruta	1	6	4	9	2	5	1	
		Cantidad entregada		89	32	57	24	198		
5	1	Ruta	1	4	9	3	7	8	1	
		Cantidad entregada		64	108	104	78	30		

TABLA NRO. 22. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 8$

xii.

Horizonte de planeación	6 días
# clientes	9
# vehículos	4
Capacidad del vehículo	400 unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3	4	5	6
1	113	95	1	337	337	337	337	337	337
2	266	433	2	12	12	12	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15	15	15	15
9	332	420	9	55	55	55	55	55	55
10	388	385	10	21	21	21	21	21	21

Capacidad del nodo		Inventario inicial (i,0)	
1	1178	1	281
2	36	2	24
3	118	3	59
4	64	4	32
5	198	5	99
6	267	6	178
7	117	7	78
8	30	8	15
9	110	9	55
10	42	10	21

TABLA NRO. 23. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 9$

z		COSTO	5629	relmipgap 0.544787							
		Día	1	2	3	4	5	6			
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	281	618	155	92	29	1			
		Producción	337	337	337	337	337	337			
		Despachos	0	800	400	400	365	0			
		Inventario final	618	155	92	29	1	338			
Día	Vehículo	Ruta	1	5	3	9	1				
2	1	Cantidad entregada		198	92	110					
		Ruta	1	8	6	7	4	10	1		
3	2	Cantidad entregada		30	178	107	64	21			
		Ruta	1	2	5	3	9	10	1		
4	4	Cantidad entregada		20	198	85	55	42			
		Ruta	1	8	2	5	3	7	4	10	1
5	1	Cantidad entregada		15	28	99	118	49	49	42	
		Ruta	1	8	6	4	9	1			
5	4	Cantidad entregada		30	178	47	110				

TABLA NRO. 24. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 9$

xiii.

Horizonte de planeación	6 días
# clientes	10
# vehículos	4
Capacidad del vehículo	400 unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3	4	5	6
1	113	95	1	411	411	411	411	411	411
2	266	433	2	12	12	12	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15	15	15	15
9	332	420	9	55	55	55	55	55	55
10	388	385	10	21	21	21	21	21	21
11	188	69	11	92	92	92	92	92	92

Capacidad del nodo		Inventario inicial (i,0)	
1	1510	1	373
2	36	2	24
3	118	3	59
4	64	4	32
5	198	5	99
6	267	6	178
7	117	7	78
8	30	8	15
9	110	9	55
10	42	10	21
11	276	11	184

TABLA NRO. 25. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 10$

z		COSTO	5642	relmipgap 0.564959					
		Día	1	2	3	4	5	6	
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	373	384	92	73	84	95	
		Producción	411	411	411	411	411	411	
		Despachos	400	703	430	400	400	0	
		Inventario final	384	92	73	84	95	506	
Día	Vehículo								
1	4	Ruta	1	6	4	10	9	3	1
		Cantidad entregada		154	53	24	110	59	
2	3	Ruta	1	11	8	1			
		Cantidad entregada		276	30				
	4	Ruta	1	4	10	2	3	5	1
		Cantidad entregada		43	39	12	118	185	
3	1	Ruta	1	6	7	2	5	1	
		Cantidad entregada		202	39	36	123		
	2	Ruta	1	8	1				
		Cantidad entregada		30					
4	3	Ruta	1	4	7	10	9	11	8
		Cantidad entregada		64	117	42	70	92	15
5	3	Ruta	1	9	3	5	1		
		Cantidad entregada		95	118	187			

TABLA NRO. 26. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 10$

xiv.

Horizonte de planeación	6 días
# clientes	12
# vehículos	4
Capacidad del vehículo	400 unidades

Coordenadas	x	y	Demanda (i,t)	1	2	3	4	5	6
1	113	95	1	468	468	468	468	468	468
2	266	433	2	12	12	12	12	12	12
3	257	469	3	59	59	59	59	59	59
4	363	330	4	32	32	32	32	32	32
5	158	453	5	99	99	99	99	99	99
6	423	238	6	89	89	89	89	89	89
7	363	368	7	39	39	39	39	39	39
8	182	3	8	15	15	15	15	15	15
9	332	420	9	55	55	55	55	55	55
10	388	385	10	21	21	21	21	21	21
11	188	69	11	92	92	92	92	92	92
12	374	148	12	51	51	51	51	51	51
13	296	322	13	20	20	20	20	20	20

Capacidad del nodo	Inventario inicial (i,0)
1	1741
2	36
3	118
4	64
5	198
6	267
7	117
8	30
9	110
10	42
11	276
12	153
13	40

TABLA NRO. 27. Datos de entrada para la instancia de prueba de $t = 6$ y $n = 12$

z		COSTO	6291	relmipgap 0.518677						
		Día	1	2	3	4	5	6		
Cadena de suministro		Inventario inicial (proveedor)	434	544	228	390	60	137		
		Producción	468	468	468	468	468	468		
		Despachos	358	784	306	798	391	0		
		Inventario final	544	228	390	60	137	605		
Día	Vehículo									
1	2	Ruta	1	13	2	9	10	7	4	1
		Cantidad entregada		40	24	110	42	78	64	
2	1	Ruta	1	13	5	3	9	1		
		Cantidad entregada		20	198	118	55			
3	2	Ruta	1	8	11	1				
		Cantidad entregada		30	276					
4	3	Ruta	1	8	11	12	6	4	1	
		Cantidad entregada		15	92	51	178	64		
5	4	Ruta	1	13	5	3	2	10	1	
		Cantidad entregada		40	174	118	24	42		
5	1	Ruta	1	5	3	9	10	7	1	
		Cantidad entregada		123	59	110	21	78		

TABLA NRO. 28. Resultados de la instancia de prueba para $t = 6$ y $n = 12$

8.2 Fase B

i.

Los datos de entrada para este escenario pueden observarse en la TABLA NRO. 1.

t	3	Media	58,2
Cliente #	5	Desvesta	36,860548

#	Aleatorio	F.O	z	#	Aleatorio	F.O	z
1	50	1644	1	26	30	1644	3
2	58	1644	1	27	13	1644	2
3	60	1752	2	28	36	1644	1
4	1	1644	1	29	32	1644	1
5	54	1644	1	30	25	1644	2
6	51	1644	1	31	63	2325	21
7	67	2325	24	32	52	1644	1
8	16	1644	2	33	66	2325	21
9	20	1644	1	34	66	2325	20
10	37	1644	1	35	24	1644	1
11	25	1644	1	36	105	2326	8
12	5	1644	1	37	69	2325	20
13	90	2325	11	38	56	1644	2
14	17	1644	1	39	62	1872	3
15	19	1644	1	40	114	2326	7
16	58	1644	1	41	9	1644	2
17	42	1644	1	42	3	1644	1
18	3	1644	2	43	44	1644	1
19	39	1644	1	44	44	1644	1
20	52	1644	1	45	9	1644	1
21	125	2325	6	46	50	1644	2
22	34	1644	2	47	58	1644	1
23	28	1644	1	48	40	1644	1
24	53	1644	2	49	14	1644	2
25	15	1644	1	50	39	1644	2

Máximo	125	Media F.O.	1773,34
Mínimo	1	Media z	3,9 s

TABLA NRO. 29. Resultados de 50 corridas de las instancias de prueba para t = 3 y el 5° cliente con demanda estocástica

ii.

Los datos de entrada para este escenario pueden observarse en la TABLA NRO. 15.

t	6	Media	58,2
Cliente #	2	Desvesta	36,860548

#	Aleatorio	F.O	z	#	Aleatorio	F.O	z
1	118	3127	6	26	114	3127	6
2	109	3127	9	27	113	3127	6
3	50	2325	18	28	33	2325	19
4	44	2325	17	29	52	2325	18
5	30	1752	4	30	26	1752	4
6	92	2670	5	31	36	2325	19
7	60	2325	10	32	16	1685	2
8	70	2325	6	33	29	1752	4
9	38	2325	23	34	155	3929	6
10	56	2325	16	35	59	2325	14
11	78	2325	6	36	158	3929	4
12	70	2325	6	37	63	2325	10
13	20	1752	3	38	46	2325	18
14	91	2670	5	39	51	2325	16
15	89	2670	7	40	32	1872	5
16	49	2325	16	41	64	2325	9
17	85	2487	7	42	57	2325	16
18	61	2325	9	43	57	2325	16
19	102	3127	9	44	71	2325	6
20	66	2325	9	45	64	2325	9
21	144	3127	3	46	123	3127	5
22	1	1685	1	47	134	3127	3
23	40	2325	19	48	84	2487	7
24	6	1685	1	49	62	2325	11
25	50	2325	18	50	8	1685	2

Máximo	158	Media F.O.	2438,56
Mínimo	1	Media z	9,36

TABLA NRO. 30. Resultados de 50 corridas de las instancias de prueba para t = 6 y el 2º cliente con demanda estocástica

En la FIGURA NRO. 14, 15, 16, 17 y 18 se pueden observar las rutas obtenidas para abs1n12 en los diferentes días del horizonte de planificación; cada color diferencia a cada vehículo.

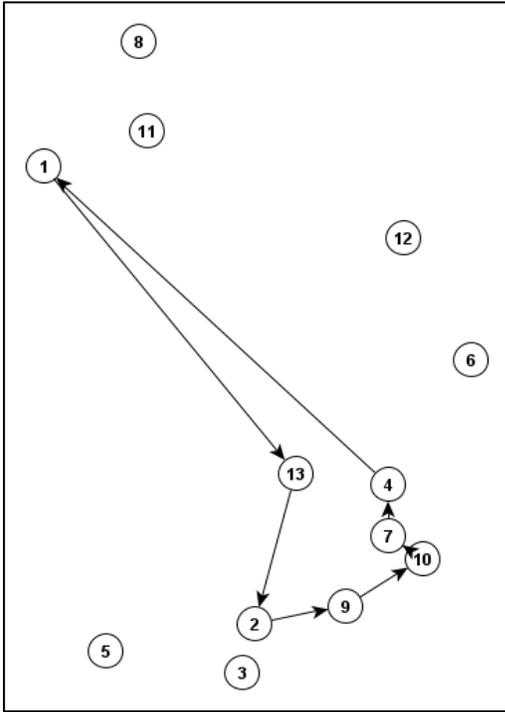


FIGURA NRO. 14. Rutas para abs1n12 en el día 1

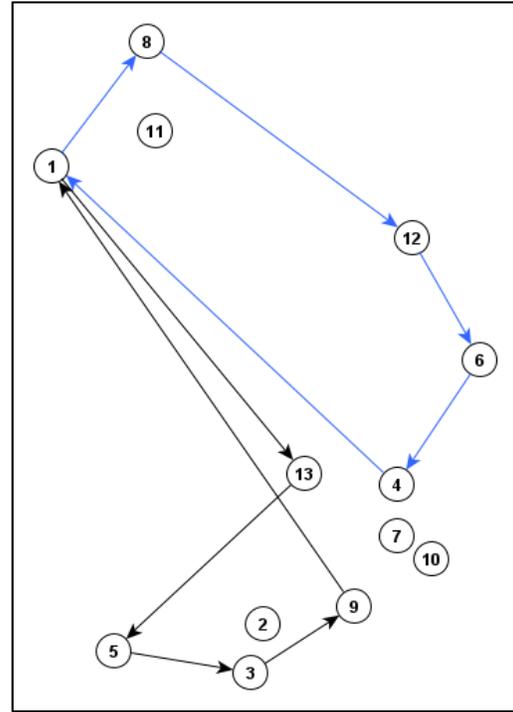


FIGURA NRO. 15. Rutas para abs1n12 en el día 2

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

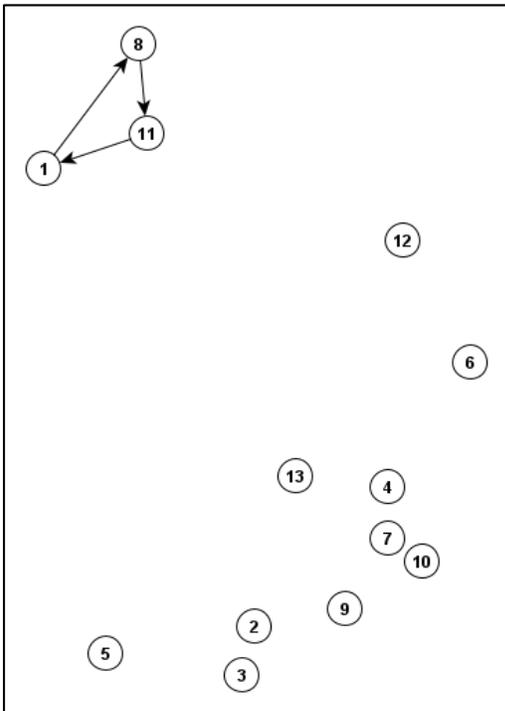


FIGURA NRO. 16. Rutas para abs1n12 en el día 3

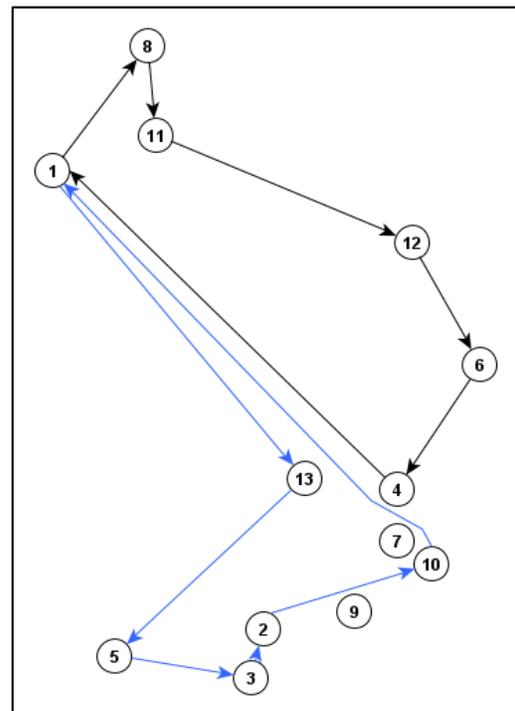


FIGURA NRO. 17. Rutas para abs1n12 en el día 4

Fuente: Elaboración propia

Fuente: Elaboración propia

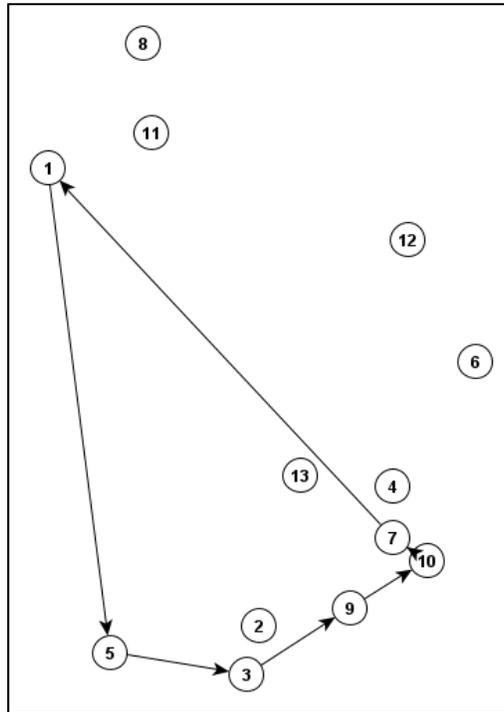


FIGURA NRO. 18. Rutas para abs1n12 en el día 5

Fuente: Elaboración propia

Del escenario de prueba abs1n12 se muestra el inventario inicial, cuando $t = 0$, en la TABLA NRO. 31; en la TABLA NRO. 32 se muestran las cantidades entregadas a cada cliente i para cada día del horizonte de planificación t ; así mismo en la TABLA NRO. 33 se especifican los inventarios finales de cada nodo i al final de cada día t .

Inventario inicial	
1	434
2	24
3	59
4	32
5	99
6	178
7	78
8	15
9	55
10	21
11	184
12	102
13	20

TABLA NRO. 31. Inventario inicial para abs1n12

Fuente: Elaboración propia

Cantidad entregada (i, t)						
	1	2	3	4	5	6
2	24	0	0	24	0	0
3	0	118	0	118	59	0
4	64	32	0	64	0	0
5	0	198	0	174	123	0
6	0	178	0	178	0	0
7	78	0	0	0	78	0
8	0	30	30	15	0	0
9	110	55	0	0	110	0
10	42	0	0	42	21	0
11	0	0	276	92	0	0
12	0	153	0	51	0	0
13	40	20	0	40	0	0

TABLA NRO. 32. Cantidad entregada a los clientes para abs1n12

Fuente: Elaboración propia

Inventario final (i , t)						
	1	2	3	4	5	6
1	544	228	390	60	137	605
2	36	24	12	24	12	0
3	0	59	0	59	59	0
4	64	64	32	64	32	0
5	0	99	0	75	99	0
6	89	178	89	178	89	0
7	117	78	39	0	39	0
8	0	15	30	30	15	0
9	110	110	55	0	55	0
10	42	21	0	21	21	0
11	92	0	184	184	92	0
12	51	153	102	102	51	0
13	40	40	20	40	20	0

TABLA NRO. 33. Inventario final de cada t para abs1n12

Fuente: Elaboración propia

9. DISCUSIONES DE LOS RESULTADOS

- No se realizan entregas todos los días, sin embargo, se satisface la demanda del cliente y éste no queda desabastecido; se mantiene el inventario del proveedor y de los clientes lo más bajo posible al final del horizonte de planificación.
- El modelo arroja resultados óptimos en cuestión de segundos para casos pequeños (cuando la cantidad de clientes es menor o igual a 8 y el horizonte de planificación es menor o igual a 3).
- Se logra optimizar la cantidad de vehículos a comprar o subcontratar. Según los resultados entregados por el modelo, usando la librería de datos y bajo las condiciones en que se corrió, sólo se requieren 2 vehículos para satisfacer las demandas.
- Con base en el modelo se pueden generar estudios de capacidad y potencia necesaria de los vehículos para realizar las entregas de forma más eficiente.
- Es posible realizar un análisis de sensibilidad financiero para la compra de flota propia y compararlo contra los costos de subcontratación del vehículo o del servicio.
- Al programar las entregas se permite organizar de manera más eficiente a los colaboradores dentro horarios que no incurran en horas extras ni dominicales.
- En otros escenarios cuando el modelo indica en los resultados más rutas en un día que vehículos disponibles (k), indica que se deben hacer viajes extra, subcontratar vehículos de acuerdo con la disponibilidad de tiempo o estudiar la posibilidad de ampliar la capacidad de los vehículos.

10. CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo fue posible adquirir nuevos conocimientos con respecto al tema, se pudo conocer la evolución de la cadena de suministro a través de los años y lograr evidenciar la relación con las diferentes áreas de la industria como lo son: administración, finanzas, producción, ventas, entre otras; así como entender que una gestión adecuada de la cadena de suministro es de suma importancia para que las empresas puedan ser competitivas en un entorno altamente cambiante como en el que vivimos actualmente, de esta manera poseer una ventaja competitiva respecto a sus competidores y, más importante aún, tener satisfechos a sus clientes.

La revisión bibliográfica abarcó conceptos fundamentales para el soporte de la investigación. En lo que respecta a las cadenas de suministros, se plantean definiciones conceptuales, así como se exponen diferentes subtemas de este y cómo son abarcados por diferentes autores los cuales dejan ver análisis de tipo tanto cualitativo como cuantitativo y convergen en que el tipo y el nivel de la demanda determina, en gran medida, la estrategia de envío adecuada a ejecutar.

En lo referente a la documentación sobre el modelamiento, técnicas de solución empleadas y diferentes variantes para el problema del IRP, se encontró una primera versión del IRP que data del año 1995, lo cual lo hace un tema que ha sido estudiado desde hace relativamente poco; en adelante se encontraron 203 documentos más hasta el 2020; posteriormente se realiza una revisión del estado del arte para examinar la evolución de los problemas de ruteo de inventarios.

La revisión muestra una clasificación del IRP según el año de publicación, dejando ver su evolución en lo relacionado con variantes y métodos de solución aplicados. A medida que aumentan los enfoques y la complejidad del problema, crece el interés de los investigadores por aplicar metaheurísticas o métodos híbridos en su solución, pero con pocos signos de ser tan efectivos al lado de métodos exactos, pero con mayor costo computacional.

Se realizó una búsqueda exhaustiva de modelos lineales enteros propuestos en la literatura para el problema de manejo de inventarios y enrutamiento de los vehículos, con el fin de formular un nuevo modelo o adaptar alguno a las necesidades de este trabajo, finalmente se adaptó el modelo propuesto por C. Archetti, Coelho, & Grazia Speranza, 2019, al cual se le realizaron algunas modificaciones con el fin de hacerlo más efectivo al momento de abordar el problema planteado.

El modelo matemático propuesto en este documento fue escrito en el lenguaje de programación AMPL, validando que la sintaxis fuera adecuada para cada restricción y formulación del modelo; al momento de correr por primera vez el modelo en el software de programación matemática CPLEX, comprobamos que la sintaxis era correcta y que el modelo estaba listo para ser validado con distintos casos de prueba.

Se validó el modelo matemático propuesto con diferentes casos de prueba, con el fin de encontrar los alcances y limitaciones de este; los resultados obtenidos confirman que el modelo presenta un mejor desempeño para casos pequeños y que cumple con lo esperado en lo referente a manejo de bajos volúmenes de inventario y generación de rutas óptimas para la entrega del producto a lo largo del horizonte de planificación.

La implementación del modelo con variaciones en la demanda se realizó mediante los escenarios $(n - 1)$, en donde se varió la demanda de un cliente escogido aleatoriamente, en dos diferentes horizontes de planeación, según una serie de números aleatorios creados mediante la distribución normal de probabilidad. Lo anterior teniendo en cuenta que, al ser un escenario estocástico, no se obtiene una única respuesta sino un estimado o promedio de la función objetivo.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aghezzaf, E. H., Raa, B., & Van Landeghem, H. (2006). Modeling inventory routing problems in supply chains of high consumption products. *European Journal of Operational Research*, 169(3), 1048–1063. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.02.008>
- Arango, M. D., & Zapata, J. A. (2017). Multiobjective Model for the Simultaneous Optimization of Transportation Costs, Inventory Costs and Service Level in Goods Distribution. *IEEE Latin America Transactions*, 15(1), 129–136. <https://doi.org/10.1109/TLA.2017.7827916>
- Archetti, C., Bertazzi, L., Laporte, G., & Speranza, M. G. (2007). A branch-and-cut algorithm for a vendor-managed inventory-routing problem. *Transportation Science*, 41(3), 382–391. <https://doi.org/10.1287/trsc.1060.0188>
- Archetti, C., Bianchessi, N., Irnich, S., & Speranza, M. G. (2014). Formulations for an inventory routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 21(3), 353–374. <https://doi.org/10.1111/itor.12076>
- Archetti, C., Christiansen, M., & Speranza, M. G. (2018). Inventory routing with pickups and deliveries. *European Journal of Operational Research*, 268(1), 314–324. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.010>
- Archetti, C., Coelho, L. C., & Grazia Speranza, M. (2019). An exact algorithm for the inventory routing problem with logistic ratio. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 131, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.09.016>
- Avella, P., Boccia, M., & Wolsey, L. A. (2018). Single-period cutting planes for inventory routing problems. *Transportation Science*, 52(3), 497–508. <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0729>
- Aziz, N. A. B., & Moin, N. H. (2007). Genetic algorithm based approach for the multi product multi period inventory routing problem. *IEEM 2007: 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 1619–1623. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2007.4419466>
- Ballou, R. (2004). Logística, Administración de la cadena de suministro. In *Logística. Adm. la cadena Suminist.* (5th ed.). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Bard, J. F., & Nananukul, N. (2009). Heuristics for a multiperiod inventory routing problem with production decisions. *Computers and Industrial Engineering*, 57(3), 713–723. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.01.020>
- Bertazzi, L., Coelho, L. C., De Maio, A., & Laganà, D. (2019). A matheuristic algorithm for the multi-depot inventory routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 524–544. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.01.005>
- Bertazzi, L., & Speranza, M. G. (2013). Inventory routing problems with multiple customers. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 2(3), 255–275. <https://doi.org/10.1007/s13676-013-0027-z>
- Bose, I., Pal, R., & Ye, A. (2008). ERP and SCM systems integration: The case of a valve manufacturer in China. *Information and Management*, 45(4), 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.im.2008.02.006>

- Campbell, A. M., & Hardin, J. R. (2005). Vehicle minimization for periodic deliveries. *European Journal of Operational Research*, 165(3), 668–684. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.09.036>
- Cannella, S., Ciancimino, E., Framinan, J. M., & Disney, S. M. (2010). Los cuatro arquetipos de cadenas de suministro. *Universia Business Review*, 26, 134–149.
- Cao, Q., Gan, Q., & Thompson, M. A. (2013). Organizational adoption of supply chain management system: A multi-theoretic investigation. *Decision Support Systems*, 55(3), 720–727. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2013.02.003>
- Celis, J. (2017). Calidad en la Cadena de Suministro de Casa Sauza. *Procesos Del Tequila*. <https://www.casasauza.com/procesos-tequila-sauza/calidad-cadena-suministro-casa-sauza>
- Cheng, S., & Wang, Z. (2019). Solve the IRP problem with an improved discrete differential evolution algorithm. *International Journal of Intelligent Information and Database Systems*, 12(1–2), 20–31. <https://doi.org/10.1504/IJIDS.2019.102324>
- Chitsaz, M., Divsalar, A., & Vansteenwegen, P. (2016). A two-phase algorithm for the cyclic inventory routing problem. *European Journal of Operational Research*, 254(2), 410–426. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.056>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2013). Administración de la cadena de suministro. In *Estrategia, planeación y operación*.
- Coelho, L. C., Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2012a). The inventory-routing problem with transshipment. *Computers and Operations Research*, 39(11), 2537–2548. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.12.020>
- Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2012b). Consistency in multi-vehicle inventory-routing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 24, 270–287. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2012.03.007>
- Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2014a). Heuristics for dynamic and stochastic inventory-routing. *Computers and Operations Research*, 52(PART A), 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.07.001>
- Coelho, L. C., Cordeau, J. F., & Laporte, G. (2014b). Thirty years of inventory routing. *Transportation Science*, 48(1), 1–19. <https://doi.org/10.1287/trsc.2013.0472>
- Coelho, L. C., & Laporte, G. (2013a). A branch-and-cut algorithm for the multi-product multi-vehicle inventory-routing problem. *International Journal of Production Research*, 51(23–24), 7156–7169. <https://doi.org/10.1080/00207543.2012.757668>
- Coelho, L. C., & Laporte, G. (2013b). The exact solution of several classes of inventory-routing problems. *Computers and Operations Research*, 40(2), 558–565. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.08.012>
- Coelho, L. C., & Laporte, G. (2014). Improved solutions for inventory-routing problems through valid inequalities and input ordering. *International Journal of Production Economics*, 155, 391–397. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.11.019>
- Defee, C. C., Williams, B., Randall, W. S., & Thomas, R. (2010). An inventory of theory in

- logistics and SCM research. *International Journal of Logistics Management*, 21(3), 404–489. <https://doi.org/10.1108/09574091011089817>
- Desaulniers, G., Rakke, J. G., & Coelho, L. C. (2016). A branch-price-and-cut algorithm for the inventory-routing problem. *Transportation Science*, 50(3), 1060–1076. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0635>
- Disney, S. M., & Towill, D. R. (2003). Vendor-managed inventory and bullwhip reduction in a two-level supply chain. *International Journal of Operations and Production Management*, 23(5–6), 625–651. <https://doi.org/10.1108/01443570310476654>
- Dondo, R., Méndez, C. A., & Cerdá, J. (2011). The multi-echelon vehicle routing problem with cross docking in supply chain management. *Computers and Chemical Engineering*, 35(12), 3002–3024. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.03.028>
- Estrada, M. (2007). Análisis de estrategias eficientes en la logística de distribución de paquetería. *Tesis Doctoral, UPC, Departament d'Infraestructura Del Transport i Del Territori, 2007*, 7–34. <http://hdl.handle.net/2117/93936>
- Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2020). Impact of Industry 4.0 on supply chain performance. *Production Planning and Control*. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1712487>
- Fokkema, J. E., Land, M. J., Coelho, L. C., Wortmann, H., & Huitema, G. B. (2020). A continuous-time supply-driven inventory-constrained routing problem. *Omega (United Kingdom)*, 92. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102151>
- Goel, R., Maini, R., & Bansal, S. (2019). Vehicle routing problem with time windows having stochastic customers demands and stochastic service times: Modelling and solution. *Journal of Computational Science*, 34, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2019.04.003>
- Gunasekaran, A., & Ngai, E. W. T. (2004). Virtual supply-chain management. *Production Planning and Control*, 15(6), 584–595. <https://doi.org/10.1080/09537280412331283955>
- Hasni, S., Toumi, S., Jarboui, B., & Mjirda, A. (2017). GVNS based heuristic for solving the multi-product multi-vehicle inventory routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 58, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.endm.2017.03.010>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (sexta edic). McGraw-Hill, México D.F.
- Iranmanesh, H., & Kazemi, A. (2017). A bi-objective location inventory model for three-layer supply chain network design considering capacity planning. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 26(1), 1–16. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.080627>
- Jauhar, S. K., & Pant, M. (2016). Genetic algorithms in supply chain management: A critical analysis of the literature. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 41(9), 993–1017. <https://doi.org/10.1007/s12046-016-0538-z>
- Jayaprakash, J., Thinakaran, N., & Sathish, T. (2014). JADE implementation of multi-agent based inventory routing problem. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(24), 28785–28792.

- Jiao, Y., & Ravi, R. (2019). Inventory routing problem with facility location. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11646 LNCS, 452–465. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24766-9_33
- Kheiri, A., & Zografos, K. (2019). Modelling and solving the combined inventory routing problem with risk consideration. *GECCO 2019 Companion - Proceedings of the 2019 Genetic and Evolutionary Computation Conference Companion*, 57–58. <https://doi.org/10.1145/3319619.3326773>
- Kleywegt, A. J., Nori, V. S., & Savelsbergh, M. W. P. (2002). The stochastic inventory routing problem with direct deliveries. *Transportation Science*, 36(1), 94–118. <https://doi.org/10.1287/trsc.36.1.94.574>
- Kulkarni, A., & Halder, S. (2020). A simulation-based decision-making framework for construction supply chain management (SCM). *Asian Journal of Civil Engineering*, 21(2), 229–241. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00188-0>
- Lappas, P. Z., Kritikos, M. N., & Ioannou, G. D. (2018). A hybrid evolutionary optimization algorithm for the Inventory Routing Problem. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 24(2), 75–115.
- Lee, Y. H., Jung, J. W., & Lee, K. M. (2006). Vehicle routing scheduling for cross-docking in the supply chain. *Computers and Industrial Engineering*, 51(2), 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2006.02.006>
- Li, Xiaoming. (2017). An evolutionary approach for supply chain management. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 28(4), 436–463. <https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.087787>
- Li, Xiuhui, & Wang, Q. (2007). Coordination mechanisms of supply chain systems. *European Journal of Operational Research*, 179(1), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.06.023>
- Liu, S. C., & Chen, J. R. (2011). A heuristic method for the inventory routing and pricing problem in a supply chain. *Expert Systems with Applications*, 38(3), 1447–1456. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.07.051>
- Lmariouh, J., Hachemi, N. E., Jamali, A., & Bouami, D. (2014). The multi-vehicle mutli-product inventory-routing problem: A case study. *2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport, ICALT 2014*, 319–323. <https://doi.org/10.1109/ICAdLT.2014.6866332>
- Markov, I., Bierlaire, M., Cordeau, J. F., Maknoon, Y., & Varone, S. (2018). A unified framework for rich routing problems with stochastic demands. *Transportation Research Part B: Methodological*, 114, 213–240. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.05.015>
- Masudin, I., Maghfur, Z., Mudrifah, Zulfikarijah, F., & Restuputri, D. P. (2019). Multiproduct Multivehicle Inventory Routing problem with mixed integer linear programming. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 2019(MAR)*, 2696–2705.
- Mjirda, A., Jarboui, B., Mladenović, J., Wilbaut, C., & Hanafi, S. (2016). A general variable neighbourhood search for the multi-product inventory routing problem. *IMA Journal of Management Mathematics*, 27(1), 39–54. <https://doi.org/10.1093/imaman/dpu020>

- Moin, N.H., Ab Halim, H. Z., & Yuliana, T. (2014). Metaheuristics for multi products inventory routing problem with time varying demand. *AIP Conference Proceedings*, 1605, 3–9. <https://doi.org/10.1063/1.4887556>
- Moin, Noor Hasnah. (2011). Optimization of multi periods inventory routing problem model with time varying demand. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 190–194. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2011.6117905>
- Othman, S. N., Mustaffa, N. H., Radzi, N. H. M., Sallehuddin, R., & Bazin, N. E. N. (2016). A modelling of genetic algorithm for inventory routing problem simulation optimisation. *International Journal of Supply Chain Management*, 5(4), 43–51.
- Pecar, B., & Davies, B. (2007). A new technology paradigm for collaboration in the supply chain. *International Journal of Services Operations and Informatics*, 2(3), 300–314. <https://doi.org/10.1504/IJSOI.2007.015330>
- Peng, H., Deng, C., & Peng, S. (2019). Inventory routing optimisation using differential evolution with feasibility checking and local search. *International Journal of Intelligent Information and Database Systems*, 12(1–2), 32–46. <https://doi.org/10.1504/IJIIDS.2019.102325>
- Qin, L., Yang, P., & Miao, L. (2016). Model and algorithm for inventory/routing decision in a delivery and pickup system. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 13(1), 558–566. <https://doi.org/10.1166/jctn.2016.4840>
- Rahim, M. K. I. A., Zhong, Y., Aghezzaf, E.-H., & Aouam, T. (2014). Modelling and solving the multiperiod inventory-routing problem with stochastic stationary demand rates. *International Journal of Production Research*, 52(14), 4351–4363. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.883470>
- Ramadhan, F., Imran, A., & Rizana, A. F. (2019). Threshold based algorithms for the multi-product multi-period inventory routing problem. *Journal of Engineering Science and Technology*, 14(5), 2703–2715.
- Ramkumar, N., Pazhani, S., Narendran, T. T., & Ganesh, K. (2013). Three-phase heuristic for Inventory Routing Problem. *IIE Annual Conference and Expo 2013*, 4003–4012.
- Rashid, R., Arani, S. D., Hoseini, S. F., & Omran, M. M. (2018). A new supply chain network design approach, regarding retailer's inventory level and supplier's response time. *International Journal of Operational Research*, 31(4), 421–441. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2018.090423>
- Salim, A. S. M., Mounira, T., & Ouajdi, K. (2018). A hybrid genetic algorithm for the inventory routing problem. *Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA, 2017-Octob*, 987–994. <https://doi.org/10.1109/AICCSA.2017.25>
- Saltos, R., & Aceves, R. (2012). Optimización del Reabastecimiento de una Red de Cajeros Automáticos con Costos Operativos. *Revista Tecnológica ESPOL - RTE*, 25(December 2012), 1–21.
- Shukla, N., Tiwari, M. K., & Ceglarek, D. (2013). Genetic-algorithms-based algorithm portfolio for inventory routing problem with stochastic demand. *International Journal of Production Research*, 51(1), 118–137. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.653010>

- Taarit, N. B., Mansour, F. Z., & Alouane, A. B. H. (2009). A lagrangian heuristic approach for the inventory routing problem. *2009 International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE 2009*, 1046–1051. <https://doi.org/10.1109/iccie.2009.5223884>
- Thinakaran, N., Jayaprakash, J., & Elanchezhian, C. (2019a). Greedy algorithm for inventory routing problem in a supply chain-a review. *Materials Today: Proceedings*, *16*, 1055–1060. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.195>
- Thinakaran, N., Jayaprakash, J., & Elanchezhian, C. (2019b). Optimization of total cost in inventory routing problem with homogenous type of vehicles using metaheuristic algorithm - A review. *Materials Today: Proceedings*, *16*, 1043–1047. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.193>
- Vargas Aguilar, J. C. (2005). Uso de la estimación de la distribución de probabilidad para muestras pequeñas y de la simulación en la inferencia de carteras de seguros. *Comisión de Seguros y Finanzas*, 98.
- Vidović, M., Popović, D., & Ratković, B. (2014). Mixed integer and heuristics model for the inventory routing problem in fuel delivery. *International Journal of Production Economics*, *147*(PART C), 593–604. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.04.034>
- Webb, I. R., & Larson, R. C. (1995). Period and phase of customer replenishment: A new approach to the Strategic Inventory/Routing problem. *European Journal of Operational Research*, *85*(1), 132–148. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)E0232-M](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0232-M)
- Widiyadana, G.A., & Irohara, T. (2019). Modelling multi-tour inventory routing problem for deteriorating items with time windows. *Scientia Iranica*, *26*(2 C), 932–941. <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20178>
- Widiyadana, Gede Agus, Irohara, T., & Budiman, S. D. (2016). Inventory routing problem for deteriorating items with multi tours. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 8-10 March, 2526–2537.
- Xiao, N., & Rao, Y. L. (2016). Multi-product multi-period inventory routing optimization with time window constrains. *International Journal of Simulation Modelling*, *15*(2), 352–364. [https://doi.org/10.2507/IJSIMM15\(2\)CO8](https://doi.org/10.2507/IJSIMM15(2)CO8)
- Yang, M. F., & Lin, Y. (2012). Integrated cooperative inventory models with one vendor and multiple buyers in the supply chain. *European Journal of Industrial Engineering*, *6*(2), 153–176. <https://doi.org/10.1504/EJIE.2012.045603>
- Yu, G., Chu, F., & Chen, H. (2006). A model and algorithm for large scale stochastic inventory routing problem. *Proceedings - ICSSSM'06: 2006 International Conference on Service Systems and Service Management*, *1*, 355–360. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2006.320640>
- Yu, Y., Chen, H., & Chu, F. (2008). A new model and hybrid approach for large scale inventory routing problems. *European Journal of Operational Research*, *189*(3), 1022–1040. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.02.061>
- Zaitseva, A., Hvattum, L. M., & Urrutia, S. (2019). Profit Maximization in Inventory Routing Problems. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, 2019-Decem*, 1230–1234. <https://doi.org/10.1109/IEEM.2018.8607713>

- Zeng, W., & Zhao, Q. (2010). Study of stochastic demand inventory routing problem with soft time windows based on MDP. In *Lecture Notes in Electrical Engineering: Vol. 67 LNEE*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12990-2_22
- Zheng, H. Z., Guo, H. Y., & Zhang, X. D. (2009). Modeling and approach for vmi cyclic inventory routing problem. *Proceedings of the 2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 3, 1393–1398. <https://doi.org/10.1109/ICMLC.2009.5212292>