

Modelos colaborativos para la gestión de inventarios múltiples. Aplicación en el sector artesanal colombiano

Collaborative models for managing multiple inventories. Application in the colombian artisan sector

^aJosué Iván Mesa-Mojica, ^bHugo Fernando Castro-Silva, ^cHugo Felipe Salazar-Sanabria

 ^aMagister en Ingeniería Industrial, josue.mesa@uptc.edu.co, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Boyacá, Colombia.

 ^bDoctor en gerencia de proyectos, hugofermando.castro@uptc.edu.co, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Boyacá, Colombia.

 ^cMagister en Ingeniería Industrial, hugo.salazar@uptc.edu.co, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Boyacá Colombia.

Recibido: Julio 09 de 2020 **Aceptado:** Diciembre 18 de 2020.

Forma de citar: J.I. Mesa-Mojica, H.F. Castro-Silva, H.F. Salazar-Sanabria, "Modelos colaborativos para la gestión de inventarios múltiples. Aplicación en el sector artesanal colombiano", *Mundo Fesc* vol. 11, no. 21, pp. 96-109, 2020

Resumen

El objetivo de esta investigación es generar políticas de gestión de inventarios colaborativas que disminuyan los costos asociados a la gestión de inventarios y aumenten el nivel de servicio ofrecido a los clientes en el sector de las artesanías en Colombia bajo el concepto Vendor Managed Inventory. Planteando un diseño metodológico que consta de cinco fases: revisión de literatura, recopilación de información, análisis de información, formulación y solución de modelos, y generación y simulación de políticas de gestión de inventarios. Obtenido como resultado la formulación de cuatro modelos para realizar la gestión de inventarios: dos modelos estocásticos para una única materia prima y dos modelos estocásticos para múltiples materias primas. Por último, se comparan cada una de las políticas de gestión de inventarios generadas por cada modelo, seleccionando las políticas de gestión de inventarios generadas por los modelos que contemplan múltiples productos, debido a que disminuyen los costos asociados a inventarios y aumentan el nivel de servicio ofrecido a los clientes.

Palabras clave: Gestión inventarios, VMI, Modelos estocásticos, Simulación

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: josue.mesa@uptc.edu.co



Abstract

The objective of this research is to generate collaborative inventory management policies that reduce the costs associated with inventory management and increase the level of service offered to customers in the handicrafts sector in Colombia under the Vendor Managed Inventory concept. Posing a methodological design that consists of five phases: literature review, information gathering, information analysis, model formulation and solution, and generation and simulation of inventory management policies. The result was the formulation of four models to carry out inventory management: two stochastic models for a single raw material and two stochastic models for multiple raw materials. Finally, each one of the inventory management policies generated by each model is compared, selecting the inventory management policies generated by the models that include multiple products, since they reduce the costs associated with inventories and increase the level of service offered to costumers.

Keywords: Inventory management, VMI, Stochastic models, Simulation

Introducción

El uso eficiente de los recursos asociados al abastecimiento permite a las organizaciones disminuir los costos asociados a la logística del negocio y aumentar el nivel de servicio ofrecido a los clientes, de esta forma, aquellas que gestionan adecuadamente sus sistemas de abastecimiento logran mejorar sus niveles de competitividad en el contexto nacional e internacional [1]. Generalmente, los sistemas de gestión de abastecimiento deben abordar tres funciones: la gestión de compras, la recepción y el almacenamiento [2]. La función de almacenamiento la encargada de formular las políticas de gestión de inventarios para las materias primas e insumos que conforman el sistema de gestión de abastecimiento. Según [3], la gestión de inventarios es muy importante para las organizaciones debido a que tener niveles de inventarios óptimos permite generar mayores ganancias, sin embargo, al no tener niveles de inventarios óptimos se generan pérdidas. Por tanto, es fundamental para el éxito empresarial fijar los niveles de inventarios adecuados a la operación del negocio.

De manera complementaria en [4], se analizan los impactos generados por la falta de inventarios, identificando la pérdida de

ventas como el aspecto de mayor impacto negativo generado. Adicionalmente, el tener un sistema de gestión de inventarios eficiente permite disminuir los costos asociados al mantenimiento de materiales almacenados y garantizar la disponibilidad de las materias primas en los procesos productivos, lo que permite aumentar el nivel de servicio ofrecido a los clientes y hacer más competitivas las organizaciones [5]. Sin embargo, las organizaciones no deben de excederse en los niveles de inventarios, dado que esto aumentaría los costos asociados a la gestión de inventarios y afectaría directamente las finanzas de las empresas, por lo tanto, es de vital importancia buscar la relación óptima entre cantidad de unidades en inventario y los costos asociados a estos niveles de inventarios [6].

Para formular modelos que permitan hacer la gestión de inventarios eficiente en una organización, es de vital importancia realizar una revisión de la literatura de los modelos de inventarios utilizados en otras investigaciones. Por lo que, en este trabajo se realizó una revisión de la literatura de modelos planteados bajo el concepto Vendor Managed Inventory (VMI) durante los últimos 10 años. El IM fue considerado en esta investigación, teniendo en cuenta que este concepto delega la función de gestión de inventarios de los clientes a los proveedores.

con productos perecederos, teniendo una función de probabilidad para las pérdidas y considerando el descuento por cantidades a pedir. A su vez, en el mismo trabajo de [9] se propone el método Taguchi para calcular los parámetros de los algoritmos. Mientras que en [10], se utiliza un modelo no lineal multiobjetivo para determinar los niveles a mantener en inventarios, teniendo como supuestos una demanda constante, el tiempo de compra no es significativo respecto al tiempo del ciclo, costos de instalación de producción al inicio del ciclo de reposición y el horizonte planificación es infinito.

Dentro de este mismo enfoque VMI, [11] formula un modelo en el que se tiene un proveedor y un minorista, y donde utilizan un algoritmo heurístico de enjambre de partículas para la obtención de los niveles de inventario. A su vez, [12] plantea un modelo bi-objetivo que permite determinar los niveles de inventario cuando se tiene un fabricante, un proveedor y varios minoristas, resolviéndose con una metaheurística llamada algoritmo de murciélago híbrido y un algoritmo genético, para luego comparar los resultados. De esta manera [12] demuestra que la metaheurística proporciona soluciones con menor costo para los inventarios.

Otro de los modelos bajo el enfoque VMI es el planteado por [13], donde formula un modelo estocástico para determinar los niveles de inventarios cuando se tienen dos escenarios: escenario 1, se tienen dos proveedores y un minorista; escenario 2, se tiene un proveedor y un minorista. Además, este modelo estocástico contempla un costo de oportunidad para cada proveedor [13]. Adicionalmente, en [14] se propone un modelo de triangular de proceso estocástico de demanda difusa para el sector textil, donde solo se contempla un proveedor y un minorista para la fijación de los niveles de inventarios que disminuyan los costos asociados a estos. En [15], se plantean

varios escenarios para generar políticas de gestión de inventarios, utilizando la clasificación ABC, en una empresa productora de juguetes en Dinamarca los cuales se utilizan para simular y determinar el comportamiento de variables relevantes. Complementariamente, la investigación de [16] integra modelos matemáticos y modelos de simulación que incluyen los costos asociados a inventarios y logística en la cadena de suministro para determinar los niveles de inventarios eficientes.

Trabajos como los de [17], tienen como objetivo minimizar las emisiones de carbono al optimizar los inventarios, teniendo en cuenta el control y horario de los vehículos. Por lo que plantean un modelo de programación no lineal entera mixta que contempla costo de inventarios y transporte. A su vez, [18] realiza una simulación para el análisis de la aplicabilidad de la solución de Inventory Routing Problem (IRP), teniendo un consumo determinístico y un suministro de combustible estocástico, se formula un modelo heurístico que permite integrar los costos asociados a inventarios y los costos asociados a las rutas de entregas.

No obstante, se siguen presentando modelos basados en teorías clásicas de la gestión de inventarios, por ejemplo, [19] propone un modelo de gestión de inventarios a partir de ecuaciones diferenciales que tiene como base el modelo de cantidad económica de producción (EPQ), donde el modelo permite obtener los niveles de inventarios eficientes cuando se contempla el deterioro de los productos y productos defectuosos. Otro de estos modelos es el propuesto por [20], el cual se extiende el modelo EOQ a artículos con características de deterioro y que permite escasez de productos. Complementariamente, [21] formula un modelo mejorado del EOQ, el cual considera varios artículos en crecimiento y que permite que cierta fracción de los artículos sean de

menor calidad. A su vez, [22] compara dos estrategias de revisión de inventarios, como lo es la estrategia de revisión continua y la estrategia de revisión periódica en un escenario en el que se tiene un proveedor y dos compradores, evaluando la rentabilidad de cada uno de estos sistemas.

Finalmente, y cómo resultado de la revisión de los modelos planteados bajo el concepto VMI, se identifica que en los últimos 10 años se han planteado algoritmos genéticos, algoritmos híbridos metaheurísticos, algoritmos PSO, modelos estocásticos, modelos de simulación, modelos de programación no lineal entera mixta y modelos que toman como base el modelo EOQ y EPQ. Sin embargo, ninguno de los modelos analizados contempla un abastecimiento conjunto de múltiples productos bajo el concepto VMI que incluya estrategias de revisión continua y periódica. Para llenar este vacío en la literatura científica, en esta investigación se proponen dos modelos matemáticos para la gestión de inventarios, los cuales tendrán como base 1) los modelos EOQ tradicionales, 2) el abastecimiento conjunto de múltiples productos bajo el concepto VMI y 3) la estrategia de revisión periódica. Adicionalmente, los modelos propuestos como resultado de esta investigación, permitirán realizar el seguimiento a los niveles de inventarios de cada uno de los productos después de realizar los pedidos conjuntos.

En este orden de ideas, esta investigación tiene como objetivo generar políticas de gestión de inventarios colaborativas que disminuyan los costos asociados a la gestión de inventarios y aumenten el nivel de servicio ofrecido a los clientes en el sector de las artesanías en Colombia. En esta primera fase de la investigación, se toma la asociación de artesanos productores de la provincia del Sugamuxi (APROARTES) con sede en Colombia, como organización representativa

del sector. En fases posteriores de la investigación, se validarán las políticas de gestión de inventarios colaborativas a otras empresas del sector. Esta asociación está compuesta por 61 unidades productivas artesanales, las cuales tienen 175 productos representativos, utilizando 92 materias primas o insumos para su fabricación. Por lo que, es importante para la competitividad de APROARTES, implementar estrategias colaborativas de abastecimiento, producción, distribución y marketing.

Las siguientes secciones de este documento se dedican a la descripción de la metodología empleada para lograr los objetivos de la investigación; a la presentación del análisis de los resultados obtenidos al formular e implementar los modelos planteados para la generar las políticas de gestión de inventarios; y por último se resaltan los principales aportes de esta investigación en la sección de conclusiones.

Metodología

En esta sección se analiza la metodología que se utilizó en el desarrollo de la investigación, la cual permitió generar las políticas de gestión de inventarios colaborativas para el sistema de gestión de abastecimiento de las materias primas e insumos de APROARTES. Por lo que, como menciona [23] primero se deben de identificar inicialmente el tipo o tipos de investigación a realizar, donde los tipos de investigación que se realizaron son: investigación aplicada (generar un nuevo conocimiento mediante el sistema de gestión de abastecimiento), investigación cuantitativa (es necesario realizar mediciones numéricas), investigación de campo (es necesario interactuar con la asociación y registrar sus procesos) e investigación explorativa (estudia temas en los cuales existe poca información).

El diseño metodológico empleado en esta

investigación, comprende cinco fases: 1) revisión de literatura, se realiza una revisión relacionada con los sistemas de gestión de inventarios bajo el concepto de VMI; 2) recopilación de información relacionada con el sistema de abastecimiento colaborativo de APROARTES; 3) análisis de información, se identifican las materias primas a las cuales se les generarán las políticas de gestión de inventarios y los parámetros a formar parte de los modelos a formular; 4) formulación y solución de modelos, se formulan 4 modelos estocásticos bajo el concepto VMI, en los cuales se contemplaron dos escenarios los cuales permitieron generar políticas de gestión de inventarios bajo los sistemas de revisión continua y revisión periódica; 5) generación y simulación de políticas, con el fin de seleccionar la mejor política considerando la disminución de los costos asociados a la gestión de inventarios y el incremento del nivel de servicio ofrecido a los clientes.

Para cumplir con el objetivo de esta investigación es necesario integrar la cadena de suministro de APROARTES. En este sentido, esta asociación actúa como intermediaria entre los proveedores y las unidades productivas, teniendo como esquema el presentado en la Figura 2. La decisión de utilizar a la asociación como intermediaría se debe a que tiene contacto directo con las unidades productivas, lo cual facilita estimar los consumos de las materias primas o insumos. Además, que ninguna de las unidades productivas cumple con los requisitos mínimos (cantidades mínimas de pedidos y periodicidad) impuestos por los proveedores para realizar una compra directa.

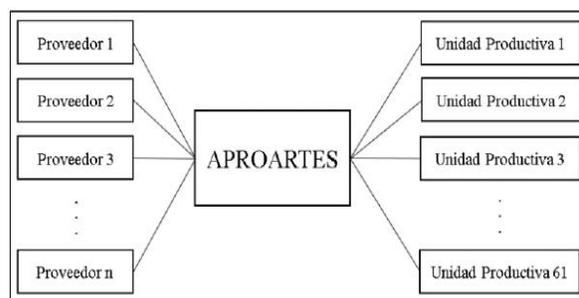


Figura 2. Esquema de integración APROARTES. Fuente: Elaborada por los autores

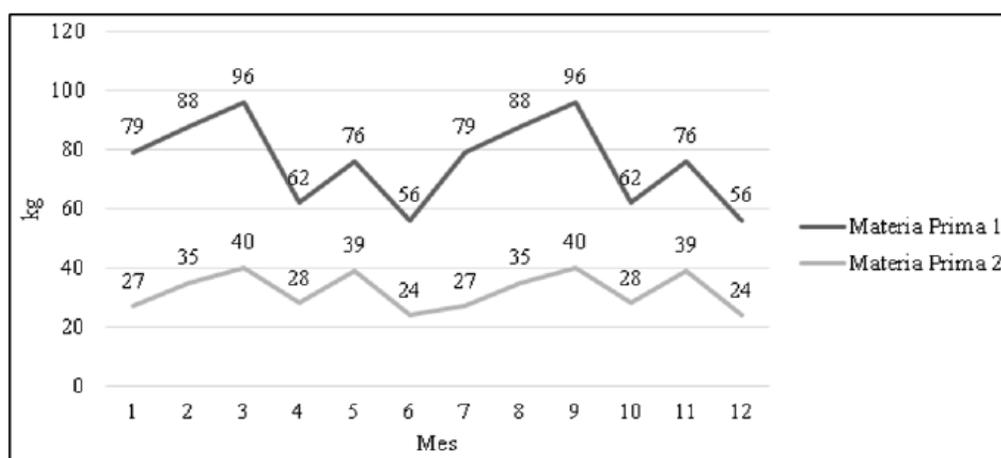
Resultados y análisis

En esta sección se formulan y resuelven cuatro modelos matemáticos: dos modelos que contemplan un único producto y dos modelos que contemplan múltiples productos, los cuales permitirán generar políticas de gestión de inventarios en APROARTES bajo el concepto VMI. La razón fundamental de plantear dos modelos que contemplan un único producto y dos modelos que contemplan múltiples productos, es demostrar como el realizar un pedido con múltiples productos permite disminuir los costos asociados a la gestión de inventarios. También se simulará cada una de las políticas de gestión de inventarios para su posterior comparación, seleccionando las políticas de gestión de inventarios para el sistema de gestión de abastecimiento de APROARTES que disminuyan los costos asociados a inventarios y aumenten el nivel de servicio ofrecido a los clientes.

El sistema de gestión de abastecimiento de APROARTES inicialmente plantea incluir tres materias primas para su gestión. Estas materias primas se seleccionaron bajo los siguientes criterios: mayor consumo y características similares (forma, uso, almacenamiento, peso y volumen). Sin embargo, para formular las políticas de gestión de inventarios en esta investigación solo se incluirán la materia prima 1 y la materia prima 2, debido a que, por lineamientos de la asociación, la materia

prima 3 se comprará a los campesinos de la región, por lo tanto, no se sabe cuántos proveedores se necesitaran (la oferta de cada uno de los campesinos es variable y no es periódica).

Con la información recolectada en cada una de las unidades productivas artesanales se procede a agrupar los consumos totales mensuales de cada materia prima, lo cual reducirá la cantidad de clientes (unidades productivas artesanales) a un solo cliente, en la Gráfica 1 se relacionan los consumos de cada materia prima en un periodo de doce meses. A su vez, dada la variabilidad de los consumos de estas materias primas en el tiempo, se procede a realizar pruebas de bondad de ajuste para determinar el comportamiento de consumo de cada materia prima. Estas pruebas de bondad y ajuste se realizaron con un nivel de significancia del 95%, obteniendo como resultado que el consumo de la materia prima 1 se ajusta a una distribución normal con media de 76,1 kg y desviación estándar de 14 kg, y el consumo de la materia prima 2 se ajusta a una distribución normal con media de 31,8 kg y desviación estándar de 6,02 kg.



Gráfica 1. Consumo materias primas APROARTES. Fuente: Elaborada por los autores

Sin embargo, para formular un modelo de gestión de inventarios no solo basta definir el comportamiento del consumo de las materias primas, sino que como menciona [24] se deben de estimar los costos que componen el modelo, los cuales son: costo de comprar (C1), costo de ordenar (C2), costo de mantener en inventario (C3) y el costo por faltantes (C4). En la Tabla I se relacionan los costos a utilizar en los modelos de inventarios de esta investigación.

Tabla I. Costos modelos de inventarios

Materia Prima	C1 (miles COP /kg)	C2 (miles COP/orden)	C3 (miles COP /kg-mes)	C4 (miles COP /kg)
Materia Prima 1	45,0	45,0	1,6	9,0
Materia Prima 2	100,0	102,4	1,7	20,0

Después de determinar el comportamiento de la demanda y los costos asociados a inventarios para cada una de las materias primas seleccionadas, se procede a formular dos modelos de gestión de inventarios para único producto, estos modelos se formularon bajo la estrategia de revisión continua y revisión periódica. A continuación, se formulan y resuelven los modelos mencionados:

Modelo estrategia revisión continúa: este modelo contempla una demanda y un tiempo de anticipación variables, donde el tiempo de anticipación dado por el proveedor varía entre 3 y 5 días, con igual probabilidad para cada uno de los días. Adicionalmente, este modelo incluye la estrategia de revisión continúa, por lo que, se revisa todos los días los niveles de inventario y al llegar a un nivel de inventario determinado se realiza el pedido. La formulación del modelo es la siguiente: con la ecuación (1) se calcula la cantidad económica de pedido, la ecuación (2) calcula el tiempo entre pedidos, la ecuación (3) calcula la cantidad de pedidos a realizar, la ecuación (4) calcula la desviación de la demanda durante el tiempo de anticipación, la ecuación (5) calcula las existencias de seguridad, la ecuación (6) calcula el nivel del inventario promedio, la ecuación (7) calcula el punto de pedido y la ecuación (8) calcula el costo total de la gestión de inventarios. Este modelo propuesto se debe formular y resolver para cada materia prima.

$$Q = \sqrt{\frac{2 * C2 * D_p}{C3}} \quad (1)$$

$$t = \frac{Q}{D_p} \quad (2)$$

$$N = \frac{D_p}{Q} \quad (3)$$

$$S'd = \sqrt{(Sd^2 * LTp) + (D_p^2 * SLT^2)} \quad (4)$$

$$ES = Z_{\alpha/2} * S'd \quad (5)$$

$$NIP = \frac{Q}{2} + ES \quad (6)$$

$$PP = D_p * LTp \quad (7)$$

$$CT = C1 * D_p + C2 * N + C3 * NIP + C4 * \frac{D_p}{Q} * S'd * E(Z) \quad (8)$$

Donde: D_p es el consumo promedio de cada materia prima, Sd es la desviación estándar del consumo de cada materia prima, LTp es el tiempo de anticipación promedio, SLT es la desviación estándar del tiempo de anticipación, $Z_{\alpha/2}$ es el valor obtenido de una distribución normal estándar inversa con un nivel de significancia de $\alpha/2$ y $E(Z)$ función de pérdidas con un nivel de significancia de α .

Seguidamente se resuelven los modelos y se obtiene como resultado la Tabla II, teniendo como resultado las siguientes políticas de gestión de inventarios: materia prima 1, pedir 101 kg cada que el inventario alcance un nivel menor o igual 11 kg; materia prima 2, pedir 50 kg cada que el inventario alcance un nivel menor o igual 5 kg. El costo total de la gestión de inventarios es de 83.877.962 COP.

Seguidamente se resuelven los modelos y se obtiene como resultado la Tabla II, teniendo como resultado las siguientes políticas de gestión de inventarios: materia prima 1, pedir 101 kg cada que el inventario alcance un nivel menor o igual 11 kg; materia prima 2, pedir 50 kg cada que el inventario alcance un nivel menor o igual 5 kg. El costo total de la gestión de inventarios es de 83.877.962 COP.

Tabla II. Resultados modelo estrategia revisión continúa

Variable	Materia Prima 1	Materia Prima 2
Q (kg/orden)	101	50
T (meses)	1,3	1,6
N (pedidos)	1	1
S'd (kg)	6	3
ES (kg)	12	6
NPI (kg)	62,5	31,0
PP (kg)	11	5
CT (COP/año)	43.495.986	40.381.976

Fuente: Elaborada por los autores

Modelo estrategia revisión periódica: este modelo contempla una demanda y un tiempo de anticipación variables, donde el tiempo de anticipación dado por el proveedor varía entre 3 y 5 días, con igual probabilidad para cada uno de los días. Adicionalmente, este modelo incluye la estrategia de revisión periódica, por lo que, se revisa los niveles de inventario cada cierto tiempo y se realiza el pedido.

La formulación del modelo es la siguiente: con la ecuación (9) se calcula la cantidad económica de pedido, la ecuación (10) calcula el tiempo entre pedidos, la ecuación (11) calcula la cantidad de pedidos a realizar, la ecuación (12) calcula la desviación de la demanda durante el tiempo de anticipación, la ecuación (13) calcula las existencias de seguridad, la ecuación (14) calcula el nivel del inventario promedio, la ecuación (15) calcula la cantidad a pedir y la ecuación (16) calcula el costo total de la gestión de inventarios. Este modelo propuesto se debe de formular y resolver para cada materia prima.

$$Q = \sqrt{\frac{2 * C2 * D_p}{C3}} \quad (9)$$

$$t = \frac{Q}{D_p} \quad (10)$$

$$N = \frac{D_p}{Q} \quad (11)$$

$$S'd = \sqrt{(Sd^2 * (LT_p + t)) + (D_p^2 * SLT^2)} \quad (12)$$

$$ES = Z_{\alpha/2} * S'd \quad (13)$$

$$NIP = \frac{Q}{2} + ES \quad (14)$$

$$CP = Q + ES - ID - UP + (D_p * LT_p) \quad (15)$$

$$CT = C1 * D_p + C2 * N + C3 * NIP + C4 * \frac{D_p}{Q} * S'd * E(Z) \quad (16)$$

Donde: D_p es el consumo promedio de cada materia prima, Sd es la desviación estándar del consumo de cada materia prima, LT_p es el tiempo de anticipación promedio, SLT es la desviación estándar del tiempo de anticipación, $Z_{\alpha/2}$ es el valor obtenido de una distribución normal estándar inversa con un nivel de significancia de $\alpha/2$, ID es el inventario disponible, UP son las unidades pedidas o en tránsito y $E(Z)$ función de perdidas con un nivel de significancia de α .

Seguidamente se resuelven los modelos y se obtiene como resultado la Tabla III, teniendo como resultado las siguientes políticas de gestión de inventarios: materia prima 1, cada 1,3 meses se pide la cantidad calcula con la ecuación (15); materia prima 2, cada

1,6 meses se pide la cantidad calcula con la ecuación (15). El costo total de la gestión de inventarios es de 84.661.979 COP.

Tabla III. Resultados modelo estrategia revisión periódica

Variable	Materia Prima 1	Materia Prima 2
Q (kg/orden)	101	50
T (meses)	1,3	1,6
N (pedidos)	1	1
S'd (kg)	18	8
ES (kg)	36	16
NPI (kg)	86,5	41,0
CT (COP/año)	43.953.869	\$40.708.111

Fuente: Elaborada por los autores

También se formulan y resuelven dos modelos para realizar la gestión de inventarios de múltiples productos, estos modelos se formularon bajo la estrategia de revisión periódica, teniendo como objetivo demostrar que sin importar cual modelo se utilice los resultados son iguales, y a su vez, como realizar un pedido que incluya varios productos disminuye los costos asociados a inventarios. A continuación, se formulan y resuelven los modelos mencionados:

Modelo de pedido conjunto T: al igual que lo modelos ya analizados, este modelo contempla una demanda variable, un tiempo de anticipación variable, se formula bajo la estrategia de revisión periódica y primero se calcula el T. La formulación del modelo es la siguiente: con la ecuación (17) calcula el tiempo entre pedidos, la ecuación (18) calcula la desviación de la demanda durante el tiempo de anticipación, la ecuación (19) calcula las existencias de seguridad, la ecuación (20) calcula la cantidad económica de pedido, la ecuación (21) calcula el nivel del inventario promedio, la ecuación (22) calcula la cantidad a pedir y la ecuación (23) calcula el costo total de la gestión de inventarios. La ecuación (17) y (23) se calculan una sola vez, el resto de ecuaciones se deben de resolver para cada una de las materias primas.

$$T = \sqrt{\frac{2 * (O + \sum_i C2_i)}{I \sum_i C1_i * Dp_i}} \quad (17)$$

$$S'd_i = \sqrt{(Sd_i^2 * (LTP + t)) + (Dp_i^2 * SLT^2)} \quad (18)$$

$$ES_i = Z_{\infty/2} * S'd_i \quad (19)$$

$$Q_i = Dp_i * T \quad (20)$$

$$NIP_i = Dp_i * \frac{T}{2} + Z_{\infty/2} * S'd_i \quad (21)$$

$$CP_i = Q_i + ES_i - ID_i - UP_i + (Dp_i * LTP) \quad (22)$$

$$CT = \sum_i C1_i * Dp_i + \frac{C2}{T} + \sum_i C3_i * \left(\frac{Q_i}{2} + ES_i\right) + \sum_i C4_i * \frac{Dp_i}{Q_i} * S'd * E(Z) \quad (23)$$

Donde: Dp_i es el consumo promedio de cada materia prima, Sd_i es la desviación estándar del consumo de cada materia prima, LTP es el tiempo de anticipación promedio, SLT es la desviación estándar del tiempo de anticipación, $Z_{\infty/2}$ es el valor obtenido de una distribución normal estándar inversa con un nivel de significancia de $\infty/2$, ID_i es el inventario disponible de cada materia prima, UP_i son las unidades pedidas o en tránsito de cada materia prima y $E(Z)$ función de perdidas con un nivel de significancia de ∞ .

Seguidamente se resuelven los modelos y se obtiene como resultado la Tabla IV.

Tabla IV. Resultados modelo pedido conjunto T

Variable	Materia Prima 1	Materia Prima 2
T (meses)	1	
S'd (kg)	16	7
ES (kg)	32	14
Q (kg/orden)	77	32
NPI (kg)	70	30
CT (COP/año)	82.267.183	

Fuente: Elaborada por los autores

Modelo de pedido conjunto Q\$: este modelo contempla una demanda variable, un tiempo de anticipación variable, se formula bajo la estrategia de revisión periódica y primero se calcula el Q \$. La formulación del modelo es la siguiente: con la ecuación (24) la cantidad

a económica a pedir en \$, la ecuación (25) calcula la cantidad económica de pedido, la ecuación (26) calcula el tiempo entre pedidos, la ecuación (27) calcula la desviación de la demanda durante el tiempo de anticipación, la ecuación (28) calcula las existencias de seguridad, la ecuación (29) calcula el nivel del inventario promedio, la ecuación (30) calcula la cantidad a pedir y la ecuación (31) calcula el costo total de la gestión de inventarios. La ecuación (24), (26) y (31) se calculan una sola vez, el resto de ecuaciones se deben de resolver para cada una de las materias primas.

$$Q\$ = \sqrt{\frac{2 * (O + \sum_i C2_i) * \sum_i C1_i * Dp_i}{I}} \quad (24)$$

$$Q_i = \frac{Q\$ * C1_i * Dp_i}{\sum_i C1_i * Dp_i} \quad (25)$$

$$T = \frac{C1_i}{\sum_i C1_i * Dp_i} * Q\$ \quad (26)$$

$$S'd_i = \sqrt{(Sd_i^2 * (LTP + t)) + (Dp_i^2 * SLT^2)} \quad (27)$$

$$ES_i = Z_{\infty/2} * S'd_i \quad (28)$$

$$NIP_i = Dp_i * \frac{T}{2} + Z_{\infty/2} * S'd_i \quad (29)$$

$$CP_i = Q_i + ES_i - ID_i - UP_i + (Dp_i * LTP) \quad (30)$$

$$CT = \sum_i C1_i * Dp_i + \frac{C2}{T} + \sum_i C3_i * \left(\frac{Q_i}{2} + ES_i\right) + \sum_i C4_i * \frac{Dp_i}{Q_i} * S'd * E(Z) \quad (31)$$

Donde: Dp_i es el consumo promedio de cada materia prima, Sd_i es la desviación estándar del consumo de cada materia prima, LTP es el tiempo de anticipación promedio, SLT es la desviación estándar del tiempo de anticipación, $Z_{\infty/2}$ es el valor obtenido de una distribución normal estándar inversa con un nivel de significancia de $\infty/2$, ID_i es el inventario disponible de cada materia prima, UP_i son las unidades pedidas o en tránsito de cada materia prima y $E(Z)$ función de perdidas con un nivel de significancia de ∞ .

Seguidamente se resuelven los modelos y se obtiene como resultado la Tabla V.

Tabla V. Resultados modelo pedido conjunto Q\$

Variable	Materia Prima 1	Materia Prima 2
T (meses)	1	
S'd (kg)	16	7
ES (kg)	32	14
Q (kg/orden)	77	32
NPI (kg)	70	30
CT (COP/año)	82.267.183	

Fuente: Elaborada por los autores

Como se evidencia en la Tabla IV y V, los resultados de los modelos que permiten pedir múltiples productos son iguales. Por lo tanto, la política de gestión de inventarios es la siguiente: cada mes se piden las cantidades calculadas con ecuación (22) y (30). El costo total de la gestión de inventarios es de 82.267.183 COP.

Por último, se realiza la simulación y comparación de las políticas generadas por los modelos formulados en esta investigación. Primero se comparan los costos totales de cada política, en la Tabla VI se relacionan los costos de cada una de las políticas de gestión de inventarios, identificando que la política que genera menor costo es la de pedido conjunto, con un costo total de 82.267.183 COP.

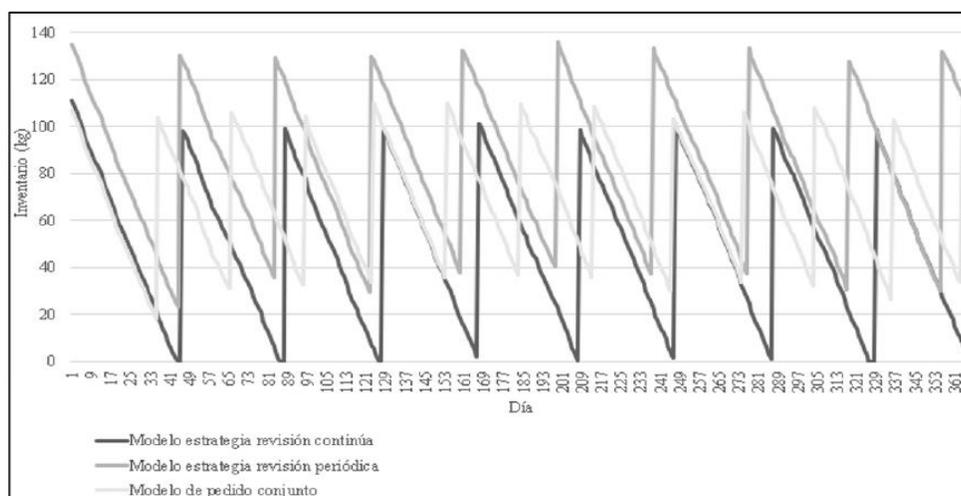
Tabla VI. Costos de las políticas de gestión de inventarios en COP

Modelo	Materia Prima 1	Materia Prima 2	Costo Total
Estrategia Revisión Continúa	43.495.986	40.381.976	83.877.962
Estrategia Revisión Periódica	43.953.869	40.708.111	84.661.979
Pedido Conjunto T	-	-	82.267.183
Pedido Conjunto Q\$	-	-	82.267.183

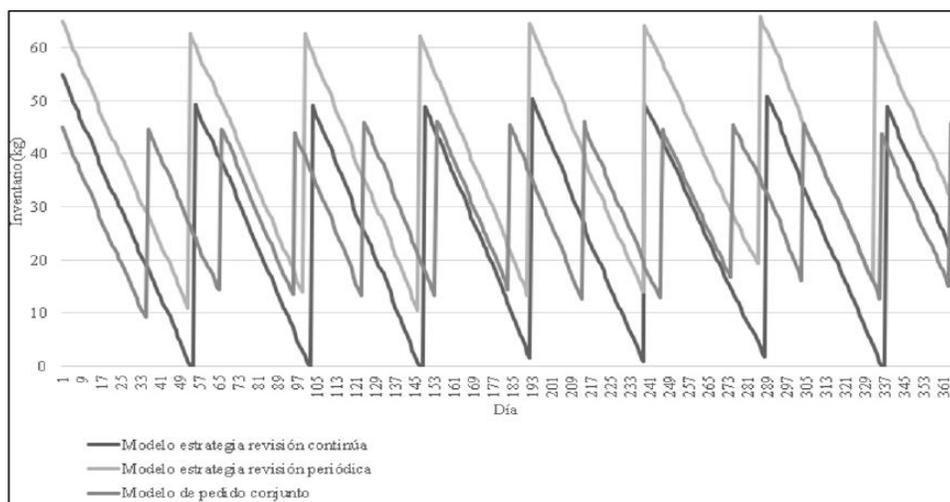
Fuente: Elaborada por los autores

Adicionalmente, se simularon cada una de las políticas de gestión de inventarios, con el fin de analizar el comportamiento de los niveles de inventarios, y a su vez, el nivel de servicio ofrecido a los clientes. La simulación tendrá una duración de un año y contemplará como estocásticos los parámetros de demanda y tiempo de anticipación. En la Gráfica 2 se observa el comportamiento de los niveles de inventario de la lana sintética y en la Gráfica

3 se observa el comportamiento de los niveles de inventario de la media lana, identificando que la mejor política es la formulada a partir del modelo de pedido en conjunto, debido a que la relación entre los niveles de inventario y las unidades faltantes es la mejor.



Gráfica 2. Niveles de inventario materia prima 1. Fuente: Elaborada por los autores



Gráfica 3. Niveles de inventario materia prima 2. Fuente: Elaborada por los autores

Con relación a lo anterior, se concluye que la mejor política de gestión de inventarios para las materias primas seleccionadas de APROARTES, es la política generada a partir del modelo de pedido conjunto, la cual es: cada mes se piden las cantidades calculadas con ecuación (22) y (30), con un costo total de la gestión de inventarios es de 82.267.183 COP. Resaltando que no se dan cantidades fijas a pedir, debido a que la cantidad a pedir depende de los niveles que se tienen en inventario al momento de realizar el pedido.

Conclusiones

El modelo formulado bajo la estrategia de revisión continua para un solo producto, permite tener menores niveles de inventarios que el resto de los modelos analizados en esta investigación, pero sigue generando costos más altos asociados a inventarios que los modelos de pedido conjunto y un menor nivel de servicio ofrecido a los clientes. Sin embargo, en el escenario en el que solo se tenga una materia prima, la estrategia de revisión continua es más eficiente que la estrategia de revisión periódica, debido a que

el costo total de la gestión de inventarios es menor. A su vez, el modelo formulado bajo la estrategia de revisión continua para un solo producto, es el más costoso, siendo la razón fundamental el tener mayores existencias de seguridad, lo que aumenta los niveles de los inventarios.

De los modelos analizados en esta investigación, el modelo que disminuye los costos asociados a la gestión de inventarios y permite aumentar el nivel de servicio ofrecido a los clientes, es el modelo de pedido conjunto. Resaltando que se puede utilizar el modelo de pedido conjunto T o Q\$ para generar las políticas de gestión de inventarios, dado que sin importar que se calcule primero los resultados son los mismos. De igual manera los modelos de pedido conjunto T y Q\$, permiten realizar un seguimiento individual a las materias primas después de realizado el pedido conjunto, lo cual permite simular el comportamiento de cada materia prima y evaluar el funcionamiento de las políticas de gestión de inventarios de APROARTES. Por lo que, la política de gestión de inventarios para las materias primas de APROARTES es la siguiente: cada mes se piden las cantidades calculadas con ecuación (22) y (30), con un costo total de la gestión de inventarios es de 82.267.183 COP.

Referencias

- [1] J. Díaz-Batista and D. Pérez-Armayo, "Optimización de los niveles de inventario en una cadena de suministro," *Rev. Ing. Ind.*, vol. 33, no. 2, pp. 126–132, 2012
- [2] D.F. Pereira, J.F. Oliveira, and M.A. Carravilla, "Tactical sales and operations planning: A holistic framework and a literature review of decision-making models," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 228, no. July 2019, 2020
- [3] J.S. Kho and J. Jeong, "On reflecting optimal inventory of profit and loss perspective for production planning," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 155, no. 2018, pp. 722–727, 2019
- [4] S.M. Disney, B. Ponte, and X. Wang, "The Nonlinear Dynamics of Order-Up-To Inventory Systems with Lost Sales," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 2291–2296, 2019
- [5] G.Barcelli-Gómez, "Gestión, planificación y control de la producción," *Ing. Ind.*, 2017
- [6] P. Alejandro and A. Santamaría, "Un modelo de clasificación de inventarios para incrementar el nivel de servicio al cliente y la rentabilidad de la empresa," *SERVICE*, 2012
- [7] N.J. Van Eck and L. Waltman, "Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping," *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–538, 2010
- [8] Q. Duan and T. Warren Liao, "Optimization of replenishment policies for decentralized and centralized capacitated supply chains under various demands," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 142, no. 1, pp. 194–204, 2013
- [9] M. Akbari Kaasgari, D.M. Imani, and M. Mahmoodjanloo, "Optimizing a vendor managed inventory (VMI) supply chain for perishable products by considering discount: Two calibrated meta-heuristic algorithms," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 103, pp. 227–241, 2017
- [10] S.H.R. Pasandideh, S.T.A. Niaki, and A.H. Niknamfar, "Lexicographic max-min approach for an integrated vendor-managed inventory problem," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 59, pp. 58–65, 2014

- [11] J. Sadeghi, S.M. Mousavi, S.T.A. Niaki, and S. Sadeghi, "Optimizing a multi-vendor multi-retailer vendor managed inventory problem: Two tuned meta-heuristic algorithms," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 50, pp. 159–170, 2013
- [12] J. Sadeghi, S.M. Mousavi, S.T. . Niaki, and S. Sadeghi, "Optimizing a bi-objective inventory model of a three-echelon supply chain using a tuned hybrid bat algorithm," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 70, pp. 274–292, 2014
- [13] J. Cai, P.R. Tadikamalla, J. Shang, and G. Huang, "Optimal inventory decisions under vendor managed inventory: Substitution effects and replenishment tactics," *Appl. Math. Model.*, vol. 43, pp. 611–629, 2017
- [14] S. Fang, "A triangular fuzzy demand stochastic process model for IoT," *Cogn. Syst. Res.*, vol. 52, pp. 531–536, 2018
- [15] E. Chinello, Z.N. Lee Herbert-Hansen, and W. Khalid, "Assessment of the impact of inventory optimization drivers in a multi-echelon supply chain: Case of a toy manufacturer," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 141, p. 106232, 2020
- [16] S.M. Saad and R. Bahadori, "Introducing a Unique Inventory Control Framework for Centralized VMI and JIT Production," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 1045–1050, 2019
- [17] C. Cheng, M. Qi, X. Wang, and Y. Zhang, "Multi-period inventory routing problem under carbon emission regulations," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 182, pp. 263–275, 2016
- [18] D. Popović, N. Bjelić, and G. Radivojević, "Simulation Approach to Analyse Deterministic IRP Solution of the Stochastic Fuel Delivery Problem," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 20, pp. 273–282, 2011
- [19] S. Lee and D. Kim, "An optimal policy for a single-vendor single-buyer integrated production–distribution model with both deteriorating and defective items," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 147, pp. 161–170, 2014
- [20] S. Tiwari, L. E. Cárdenas-Barrón, A. A. Shaikh, and M. Goh, "Retailer's optimal ordering policy for deteriorating items under order-size dependent trade credit and complete backlogging," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 139, no. December 2018, p. 105559, 2020
- [21] M. Sebatjane and O. Adetunji, "Economic order quantity model for growing items with imperfect quality," *Oper. Res. Perspect.*, vol. 6, p. 100088, 2019
- [22] A.A. Taleizadeh, I. Shokr, I. Konstantaras, and M. VafaeiNejad, "Stock replenishment policies for a vendor-managed inventory in a retailing system," *J. Retail. Consum. Serv.*, vol. 55, no. March, p. 102137, 2020
- [23] P.C. Martínez Carazo, "El método de estudio de caso Estrategia metodológica de la investigación científica," *Rev. científica Pensam. y Gestión*, no. 20, 2011
- [24] C.J. Vidal Holguín, *Fundamentos de control y gestión de inventarios*. 2010