

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

1

CARLOS ANTONIO AMORTEGUI FARFAN
XIOMARA ALEXANDRA LÓPEZ GALEANO
YEISON DANIEL VÉLEZ ZAPATA

Universidad EAN

Facultad de Ingeniería

Ingeniería de Producción - Ingeniería Industrial

Bogotá, Colombia

02/06/2026

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

CARLOS ANTONIO AMORTEGUI FARFAN
XIOMARA ALEXANDRA LÓPEZ GALEANO
YEISON DANIEL VÉLEZ ZAPATA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero de producción – Ingeniero industrial

Director (a):

Diana Paola Figueroa Hernández

Universidad Ean
Facultad de ingeniería
Ingeniería de producción – Ingeniería industrial
Bogotá, Colombia
02/06/2026

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Bogotá, 02/06/2026

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS.....	8
RESUMEN.....	8
PALABRAS CLAVE.....	9
ABSTRACT	10
KEYWORDS	11
INTRODUCCIÓN	11
MARCO TEÓRICO	13
- Cadena de suministro de medicamentos: complejidad sistémica.....	13
- Actores del sistema farmacéutico colombiano.....	14
- Modelos de adquisición de medicamentos en Colombia.	14
- Canales de distribución farmacéutica.....	15
- Indicadores logísticos de desempeño (KPIs).	16
- Modelos de control de inventarios.	17
- Hipótesis de escenarios críticos.....	18
- Quiebres de stock y vencimientos: dos caras del mismo problema.	20
ESTADO DEL ARTE.....	20
- Justificación del enfoque PRISMA	20
- Flujo PRISMA: cuantificación del proceso de selección.....	20
- Términos de búsqueda y bases de datos.....	22
METODOLOGÍA	24
RESULTADOS.....	27
- Resultado 1: Diagnóstico de las principales problemáticas logísticas.	28
- Resultado 2: Matriz de indicadores logísticos de desempeño (KPIs).	29
- Resultado 3: Modelo de control de inventarios.....	31
- Resultado 4: Evaluación teórica de hipótesis — Comparación de escenarios.....	32
- Resultado 5: Sistema de codificación y trazabilidad.....	34
- Resultado 6: Diseño del proceso logístico integrado	35
- Resultado 7: Simulación computacional del modelo logístico	37

5

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

- Resultado 8. Guía técnica de la gestión de la cadena de suministro de medicamentos. ...	45
DISCUSIÓN.....	47
DIVULGACIÓN.....	47
Audiencias objetivo.....	50
Productos de divulgación.	51
Estrategia de divulgación y cronograma	53
Indicadores de éxito del plan de divulgación.	53
CONCLUSIONES	54
- Sobre las problemáticas logísticas del sector farmacéutico colombiano.	54
- Sobre los indicadores logísticos de desempeño (KPIs).....	55
- Sobre el modelo de control de inventarios.	55
- Sobre la evaluación teórica de hipótesis.	56
- Sobre la simulación computacional y la interoperabilidad	57
- Limitaciones y trabajo futuro	58
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
RELACIÓN DE ANEXOS TÉCNICOS	63

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Flujo de proceso logístico de la cadena de suministro de medicamentos	36
Ilustración 2 Interfaz de generación de órdenes médicas en la simulación computacional desarrollada en Python–Streamlit.....	40
Ilustración 3 Módulo de validación y autorización de órdenes médicas por aseguradora.	41
Ilustración 4 Interfaz del módulo de reserva de inventarios de medicamentos	41
Ilustración 5 Módulo de dispensación de medicamentos por parte del operador farmacéutico ...	42
Ilustración 6 Interfaz del módulo de trazabilidad y analítica para la toma de decisiones	43
Ilustración 7 Interfaz del módulo de inventarios y traza de los eventos logísticos	44

Índice de tablas

Tabla 1	Flujo de selección de estudios según metodología PRISMA	21
Tabla 2	Diagnóstico consolidado de problemáticas logísticas en la cadena de suministro de medicamentos.	28
Tabla 3	Matriz de indicadores logísticos de desempeño (KPIs) para la cadena de suministro de medicamentos.	30
Tabla 4	Formulación analítica del modelo de control de inventarios para medicamentos.	31
Tabla 5	Evaluación comparativa de escenarios con y sin modelo de control de inventarios	33
Tabla 6	Sistemas de codificación y trazabilidad de medicamentos en Colombia y su función en el modelo logístico.	34
Tabla 7	Audiencias objetivo del plan de divulgación.	50
Tabla 8	Cronograma del plan de divulgación.	53

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

AGRADECIMIENTOS

Sincero agradecimiento a la Universidad EAN, a la directora del proyecto, Diana Paola Figueroa Hernández, y a los docentes del programa de Ingeniería Industrial y Producción, cuyo acompañamiento, orientación crítica y enseñanzas en gestión de cadenas de suministro fueron determinantes para el desarrollo de este trabajo.

A las instituciones y repositorios académicos que facilitaron el acceso a fuentes de información secundaria, y a nuestras familias, por el apoyo incondicional durante este proyecto, va igualmente nuestro reconocimiento.

RESUMEN

La gestión ineficiente de inventarios en cadenas de suministro farmacéuticas constituye una de las problemáticas más críticas del sector salud en Colombia, generando simultáneamente quiebres de stock —que afectan la continuidad de los tratamientos— y vencimientos de medicamentos, con impacto económico significativo. Vidal (2010) señala que la gestión de inventarios en productos de vida limitada requiere políticas que equilibren el riesgo de desabastecimiento y el costo del exceso, situación especialmente relevante en el contexto farmacéutico.

El desarrollo de este modelo integral se plantea para la evaluación y optimización del desempeño logístico en las cadenas de suministro de medicamentos, para esto se adoptan indicadores claves de desempeño, la estructuración de una guía técnica de implementación y la verificación de interoperabilidad entre los diferentes actores a través de un modelo computacional. La investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo aplicado, combinando

la revisión sistémica de la literatura mediante la metodología PRISMA (Moher et al., 2009) con la validación práctica del modelo.

Como aporte de la aplicación, se utilizó la herramienta de Python – Streamlit para la simulación del comportamiento de una cadena de suministro a través de variables como la demanda (formulación médica), gestión de inventarios, autorizaciones por las entidades de pago, reservas y dispensación de medicamentos. El modelo se basa en la gestión por los actores a través de eventos que se interconectan en una unidad de procesamiento central. Permitiendo así evaluar escenarios operativos críticos relacionados con fluctuación de la demanda, interrupciones en el abastecimiento y variaciones en los tiempos de entrega.

Los resultados obtenidos logran demostrar que la integración entre los diferentes actores y el modelo basado en eventos a través de analítica y trazabilidad de los datos fortalece la toma de decisiones logísticas, lo que contribuye a la reducción de riesgos de desabastecimiento o sobre inventario.

Finalmente, se presenta una guía técnica de implementación y una herramienta funcional de simulación orientada a apoyar la gestión logística de IPS, EPS y operadores farmacéuticos del sector salud colombiano.

PALABRAS CLAVE

Cadena de suministro de medicamentos · Indicadores logísticos (KPIs) · Control de inventarios · Simulación computacional · Python–Streamlit · Quiebres de stock · Vencimientos de medicamentos · Desempeño logístico · Guía técnica de implementación · Sector farmacéutico Colombia · Metodología PRISMA.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

ABSTRACT

Inefficient inventory management in pharmaceutical supply chains constitutes one of the most critical challenges within the Colombian healthcare sector, simultaneously generating stockouts—which affect the continuity of medical treatments—and medication expirations, resulting in significant economic impacts. Vidal (2010) states that inventory management for products with limited shelf life requires policies that balance the risk of shortages with the costs associated with excess inventory, a situation that is particularly relevant in the pharmaceutical context.

The development of this integrated model is aimed at evaluating and optimizing logistics performance in pharmaceutical supply chains. To achieve this, key performance indicators (KPIs), a technical implementation guide, and a computational model for verifying interoperability among the different stakeholders are incorporated. The research follows an applied qualitative approach, combining a systematic literature review based on the PRISMA methodology (Moher et al., 2009) with the practical validation of the proposed model.

As a practical contribution, a Python–Streamlit tool was developed to simulate the behavior of a pharmaceutical supply chain through variables such as demand (medical prescriptions), inventory management, payer authorization processes, reservations, and medication dispensing. The model is based on stakeholder interactions through interconnected events within a central processing unit, enabling the evaluation of critical operational scenarios related to demand fluctuations, supply disruptions, and variations in lead times.

The results demonstrate that the integration of different stakeholders and the event-based model, supported by data analytics and traceability, strengthens logistics decision-making and contributes to reducing the risks of stockouts and overstocking.

Finally, a technical implementation guide and a functional simulation tool are presented to support logistics management for healthcare providers (IPS), health insurance entities (EPS), and pharmaceutical operators within the Colombian healthcare sector.

KEYWORDS

Pharmaceutical supply chain · Logistics performance indicators (KPIs) · Inventory control · Computational simulation · Python–Streamlit · Stockouts · Drug expirations · Logistics performance · Technical implementation guide · Colombian pharmaceutical sector · PRISMA methodology.

INTRODUCCIÓN

Colombia durante la última década ha presentado grandes retos en la gestión de abastecimientos de las cadenas de suministro de medicamentos, la cual se posiciona como uno de los pilares mas sensibles del sector salud. Esta gestión involucra productos con fechas de vencimiento limitadas, condiciones especiales de almacenamiento y una demanda variable influenciada por factores epidemiológicos, estacionales y regulatorios. Adicional, las fallas en disponibilidad en los medicamentos afectan directamente la continuidad en los tratamientos y la calidad de la atención prestada a los pacientes. Bajo este panorama, Ballou (2004) señala que en este tipo de cadenas de suministro que operan bajo entornos críticos se requiere eficiencia operativa y adicional la implementación de mecanismos de control y medición que permitan, prever y anticipar los riesgos inherentes a la operación y así buscar la implementación de mecanismos de mitigación.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

Estos desafíos adquieren una relevancia particular caracterizadas por el sistema de salud, y la forma en que interactúan los diferentes actores, incluyendo laboratorios, operadores logísticos, gestores farmacéuticos, IPS y ERP. Es por esto que La Superintendencia Nacional de Salud (2020) ha reportado múltiples problemas asociados al desabastecimiento de medicamentos esenciales, mientras que el SISMED (2022) evidencia pérdidas económicas derivadas al vencimiento de productos farmacéuticos. Asimismo, estudios realizados por Ramírez y López (2020) y los informes del Ministerio de Salud (2021) dejan en evidencia que estas problemáticas son recurrentes en diferentes regiones del país y que se agravaron por quiebres en las cadenas de suministro globales durante y en la post pandemia de COVID-19.

La literatura ha propuesto diferentes enfoques para mejorar el desempeño de las cadenas de suministro. Por una parte, existen modelos de evaluación y análisis logístico ampliamente documentados, como el desarrollado por Safaei et al. (2024). Por otra, se encuentran modelos consolidados para la gestión y control de inventarios, entre los que destacan los aportes de Silver et al. (2017) y Nahmias (2009). Sin embargo, la integración de estas herramientas en una propuesta adaptada al contexto farmacéutico colombiano continúa siendo limitada. De acuerdo con Romero y Valenzuela (2023) y Vélez (2019), muchas organizaciones del sector salud aún carecen de metodologías que permitan relacionar indicadores de desempeño, políticas de reabastecimiento y análisis de escenarios críticos dentro de un mismo esquema de gestión.

A partir de esta necesidad, el presente proyecto propone como solución un modelo integral que permita evaluar y optimizar el desempeño logístico en las cadenas de suministro de medicamentos. Esta propuesta incorpora indicadores de desempeño, políticas de gestión de inventarios y un modelo computacional basado en eventos orientado a desarrollar la interoperabilidad entre los distintos actores.

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

13

La simulación facilita la evaluación de escenarios operativos críticos asociados a interrupciones en el abastecimiento, fluctuaciones de la demanda y variaciones en los tiempos de entrega. Asimismo, incorpora mecanismos de predicción de la demanda y herramientas de análisis que permiten medir el impacto de estos escenarios sobre indicadores como el nivel de servicio, la rotación de inventarios y la disponibilidad de medicamentos. Este enfoque es consistente con las metodologías analíticas propuestas por Simchi-Levi, Kaminsky y Simchi-Levi (2008) para el estudio y evaluación de cadenas de suministro complejas.

Finalmente, este documento presenta el desarrollo metodológico del modelo, los resultados obtenidos mediante la simulación de escenarios críticos, la discusión de los hallazgos, las conclusiones y una guía técnica de implementación orientada a organizaciones del sector salud colombiano.

MARCO TEÓRICO

El estudio de este se realiza mediante el modelo PRISMA, obteniendo como resultado de los últimos 5 años, la cadena de medicamentos en Colombia enfrenta una problemática logística debido a fallas estructurales en la gestión de inventarios, los precedentes son: requisito integral entre IPS, aseguradora, operadores logísticos y farmacias, baja capacidad de conexión, ineficiencia en el control de inventarios y la escasa aplicación de los modelos logísticos.

- **Cadena de suministro de medicamentos: complejidad sistémica.**

Chopra y Meindl (2013) enfoca la cadena de suministro de medicamentos en Colombia como una estructura organizacional, proponiendo como meta que la demanda del cliente final sea

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación de manera eficiente. El actor farmacéutico hace que el usuario dependa 100% de la disponibilidad del medicamento comprometiendo su estado de salud, para lo cual se rige una jerarquía social incomparable con otras industrias (Kelle, Woosley y Schneider, 2012). En el país, la ruptura en el sector salud presenta alteración de mayores niveles en los inventarios (Lee, Padmanabhan y Whang, 1997): las transformaciones en la demanda del usuario se concentran en la conexión mayor, generando desajustes de inventario documentados por Pinzón y Castañeda (2018).

Esta cadena de suministro de medicamentos en Colombia es direccionada por el Ministerio de Salud (INVIMA) 2020, sujetando las normas para almacenaje, distribución y dispensación, resaltando que la normativa no es la solución del reparo de las fallas logísticas, necesitando herramientas novedosas que cumpla con la optimización de inventarios Waters (2009) advierte que las cadenas reguladas pueden generar rigideces operativas que reducen la capacidad de respuesta ante variaciones en la demanda.

- **Actores del sistema farmacéutico colombiano.**

La cadena de suministro de medicamentos en el país (Colombia) compromete varios agentes con el fin que de conectar positivamente los sistemas. El estado colombiano controla normativamente a través de entidades como: INVIMA y la superintendencia nacional de salud, las EPS son las encargadas de direccionar las herramientas del sistema asegurando el acceso de medicamentos del plan de beneficiarios en salud. La función farmacéutica consiste en autorregular el almacenamiento, distribución y dispensación en poder de las (EPS), quienes se encargan de garantizar inventarios internos en atención hospitalaria son las (IPS). Finalmente, el paciente — destinatario de la cadena— es el actor cuya seguridad y bienestar justifican la criticidad del sistema logístico (Kelle et al., 2012).

- **Modelos de adquisición de medicamentos en Colombia.**

La disponibilidad de medicamentos depende en gran medida de los mecanismos de adquisición o producción. En Colombia coexisten tres modalidades principales. La importación directa representa una proporción significativa del abastecimiento, especialmente para medicamentos de alta complejidad, biotecnológicos o de reciente desarrollo. Según el Ministerio de Salud (2018), la dependencia de fabricantes internacionales implica tiempos de entrega más largos y mayor exposición a riesgos de logística internacional, regulaciones sanitarias y fluctuaciones cambiarias, lo que exige niveles de stock de seguridad más altos.

Una principal apuesta para la reducción de tiempos se basa en la fabricación genérica de medicamentos, con el fin de facilitar procesos logísticos y optimización de costos, aun así se habla de la dependencia de importación para múltiples principios activos, porque el proceso de fabricación conlleva más interoperabilidad, Como señalan Chopra y Meindl (2013), las cadenas globales requieren estrategias de planificación más robustas, incluyendo stocks de seguridad y diversificación de proveedores.

- **Canales de distribución farmacéutica.**

La distribución de medicamentos en Colombia se estructura a través de dos canales principales. El canal institucional suministra medicamentos a pacientes afiliados al sistema de salud mediante contratos entre EPS, operadores logísticos y distribuidores farmacéuticos, orientado a garantizar el acceso al Plan de Beneficios en Salud (Ministerio de Salud, 2018; OPS, 2019). El canal comercial corresponde al mercado farmacéutico minorista —farmacias,

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación droguerías y cadenas comerciales— cuya demanda responde a factores de mercado y patrones de consumo de medicamentos de venta libre (Vogler, Zimmermann y Habl, 2013). La coexistencia de ambos canales introduce complejidad en la gestión logística, pues los flujos, volúmenes y condiciones contractuales difieren significativamente entre ellos, requiriendo sistemas avanzados de planificación y control de inventarios (Ballou, 2004; Waters, 2009).

En relación con los medicamentos bajo control estatal, ciertos productos —principalmente los que contienen sustancias estupefacientes y psicotrópicas— están sujetos a un régimen de monopolio sanitario administrado por el Fondo Nacional de Estupefacientes, adscrito al Ministerio de Salud (2018). Estos productos exigen requisitos adicionales de trazabilidad, almacenamiento seguro y reportes regulatorios, lo que introduce mayores restricciones en los tiempos de reposición y refuerza la necesidad de modelos de inventario robustos que contemplen estas limitaciones (OPS, 2019; Kelle et al., 2012).

Los medicamentos cuentan con un monitoreo de baja seguridad, pues estos no solo enfrentan problemas logísticos si no que, a demás actores como las EPS y otras entidades regulatorias, “aprovechan” el acaparamiento sanitario y así ejercer presión de poder. Los medicamentos comprometen factores normativos, historial y modelos logísticos, por tanto, se establecen altas limitaciones en los tiempos de reposición y refuerza la necesidad de modelos de inventario robustos que contemplen estas restricciones (OPS, 2019; Kelle et al., 2012).

- **Indicadores logísticos de desempeño (KPIs).**

Los KPIs logísticos son el puente entre el diagnóstico del desempeño y las decisiones de reabastecimiento. Kaplan y Norton (1992) establecieron que los sistemas de medición deben equilibrar perspectivas financieras, operativas, de clientes y de aprendizaje —el Balanced

Scorecard—, principio igualmente aplicable a la logística farmacéutica. Los indicadores más relevantes para este sector son: nivel de servicio, tasa de quiebre de stock, rotación de inventario, cobertura de inventario, costo de mantenimiento y tasa de vencimientos (CSCMP, 2013).

La evidencia empírica confirma que la ausencia de KPIs formales es una barrera estructural. Romero y Valenzuela (2023) demuestran en el contexto colombiano que sin indicadores formales no es posible priorizar intervenciones ni evaluar su impacto. Safaei et al. (2024) añaden que los modelos de evaluación deben integrar indicadores cuantitativos con criterios cualitativos de resiliencia, dimensión especialmente relevante cuando se analizan los escenarios críticos de la sección siguiente.

- Modelos de control de inventarios.

El control de inventarios equilibra el riesgo de desabastecimiento con el costo del exceso de stock. Dado que la demanda de medicamentos es estocástica, los modelos probabilísticos son los más apropiados (Nahmias, 2009). Los principales modelos aplicables son: (a) revisión continua (s, Q), que emite un pedido fijo Q al llegar al punto de reorden s ; (b) revisión periódica (R, S), que ordena hasta el nivel S cada R períodos; (c) EOQ, que minimiza el costo total de ordenar y mantener inventario (Tersine, 1994); y (d) FEFO (First Expired, First Out), que prioriza la rotación por fecha de vencimiento y es imprescindible en el sector farmacéutico (Villarreal y Becerra, 2017). Vidal (2010) y Guerrero-Salas (2009) coinciden en que los modelos para el contexto colombiano deben ser robustos ante información parcial, pues muchas organizaciones no disponen de series históricas completas de demanda.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

- **Hipótesis de escenarios críticos.**

El análisis de escenarios críticos permite evaluar la robustez del modelo ante condiciones adversas sin necesidad de datos empíricos. Simchi-Levi, Kaminsky y Simchi-Levi (2008) argumentan que los modelos de cadena de suministro deben someterse a análisis de sensibilidad para revelar su verdadera capacidad de respuesta. Radasanu (2016) y Cachon y Terwiesch (2019) confirman que este enfoque es metodológicamente válido cuando no se dispone de datos primarios. Cada hipótesis define con precisión la variable independiente (condición de estrés), la variable dependiente (indicador afectado) y la métrica de evaluación (umbral cuantitativo esperado).

H1: Interrupción del suministro por parte del proveedor principal: Variable

independiente: Interrupción total del suministro por 4–8 semanas. Variable dependiente: Nivel de servicio (%). Métrica de evaluación: El modelo con $SS = Z \cdot \sigma L$ ($Z=1,65$ para $NS=95\%$) sostendrá un nivel de servicio $\geq 85\%$ durante la interrupción, frente al 60–70% proyectado para un sistema sin stock de seguridad calculado estadísticamente.

H2: Incremento súbito de la demanda por evento epidemiológico: Variable

independiente: Aumento del 40% en la demanda promedio durante 6 semanas. Variable dependiente: Tasa de quiebre de stock (%). Métrica de evaluación: El modelo de revisión continua (s, Q) con punto de reorden dinámico ajustado por media móvil de 4 semanas reducirá la tasa de quiebre en ≥ 30 puntos porcentuales respecto al modelo con punto de reorden estático.

H3: Caída sostenida de la demanda y riesgo de vencimientos: Variable independiente:

Reducción del 35% en la demanda durante 8–12 semanas. Variable dependiente: Tasa de vencimientos (%). Métrica de evaluación: La política FEFO con ajuste periódico del lote de

pedido reducirá la tasa de vencimientos en $\geq 50\%$ respecto a un sistema sin rotación activa, según referentes de Villarreal y Becerra (2017) y Periolo y Quiroga (2015).

H4: Variabilidad alta en el tiempo de entrega del proveedor: Variable independiente:

Desviación estándar del lead time $> 30\%$ de la media ($CV > 0,30$). Variable dependiente: Nivel de servicio (%). Métrica de evaluación: El modelo con $SS = Z \cdot \sqrt{(L \cdot \sigma d^2 + d^2 \cdot \sigma L^2)}$ ofrecerá un nivel de servicio ≥ 10 puntos porcentuales superior al modelo con SS fijo, especialmente para medicamentos de alta rotación y criticidad clínica.

H5: Efecto combinado: aumento de demanda e interrupción parcial del suministro:

Variable independiente: Incremento simultáneo de la demanda $\geq 25\%$ y reducción del 50% en la capacidad de suministro. Variable dependiente: Tiempo de detección del deterioro logístico (semanas). Métrica de evaluación: El sistema de KPIs de alerta temprana identificará el deterioro con ≥ 2 semanas de antelación respecto a un sistema reactivo, permitiendo la activación oportuna de proveedores alternativos.

Las hipótesis formuladas son implementadas y evaluadas a través de un modelo de simulación computacional desarrollado en entorno Python–Streamlit, el cual permite representar el comportamiento dinámico de la cadena de suministro bajo distintos escenarios operativos.

La simulación integra variables como demanda, niveles de inventario, reservas y dispensación de medicamentos, junto con políticas de control de inventarios —incluyendo stock de seguridad, punto de reorden y rotación FEFO— permitiendo medir su impacto sobre indicadores logísticos clave como nivel de servicio, tasa de quiebre de stock, rotación y vencimientos.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

- **Quiebres de stock y vencimientos: dos caras del mismo problema.**

Kelle, Woosley y Schneider (2012) documentan que los quiebres generan desde retrasos en tratamientos hasta sustituciones por medicamentos menos efectivos, con impacto directo en la seguridad del paciente. La Superintendencia Nacional de Salud (2020) identifica que en Colombia estos quiebres están asociados a la concentración del suministro en pocos proveedores y a la deficiente planificación de la demanda. Ramírez y López (2020) estiman que los vencimientos derivan principalmente de sobreestimaciones de la demanda y ausencia de rotación FEFO. Ambas problemáticas son síntomas de la ausencia de un modelo integral que articule la medición del desempeño con políticas de reabastecimiento adaptadas a la variabilidad del entorno farmacéutico colombiano.

ESTADO DEL ARTE

- **Justificación del enfoque PRISMA**

La metodología PRISMA —Moher et al., 2009— fue adoptada porque garantiza la transparencia y reproducibilidad del proceso de búsqueda y selección de fuentes. Safaei et al. (2024) aplicaron este mismo protocolo para fundamentar su modelo de evaluación de cadenas de suministro sostenibles, lo que valida su pertinencia para estudios de diseño de modelos teóricos en cadenas de suministro complejas.

- **Flujo PRISMA: cuantificación del proceso de selección**

El siguiente cuadro presenta el flujo cuantificado de selección de fuentes conforme al protocolo PRISMA:

Tabla 1

Flujo de selección de estudios según metodología PRISMA

Etapa PRISMA	Nº registros	Descripción del criterio
Identificación	187	Registros recuperados en Scopus, WoS, ScienceDirect, Google Scholar y repositorios colombianos mediante los términos de búsqueda definidos.
Cribado (título/resumen)	112	Se eliminaron 75 registros por duplicación o por no corresponder al sector farmacéutico ni a gestión de inventarios/KPIs.
Elegibilidad (texto completo)	51	Se descartaron 61 registros por no cumplir criterios de inclusión: idioma, antigüedad >15 años sin relevancia estructural, o ausencia de acceso al texto completo.
Incluidos	34	34 fuentes incluidas en la síntesis final: artículos indexados, libros de texto, documentos institucionales colombianos y proyectos de grado latinoamericanos.

Nota. Elaboración propia con base en la metodología PRISMA propuesta por Moher et al. (2009).

De los 34 registros incluidos, 19 corresponden a artículos de revistas indexadas (Scopus / WoS / ScienceDirect), 8 a libros de texto de referencia en logística y gestión de inventarios, 4 a documentos institucionales colombianos (INVIMA, Ministerio de Salud, Supersalud, SISMED) y 3 a proyectos de grado o tesis del contexto latinoamericano.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

- **Términos de búsqueda y bases de datos**

La búsqueda se realizó en Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar y repositorios institucionales colombianos, con los siguientes términos:

"cadena de suministro de medicamentos" AND "indicadores logísticos"

"pharmaceutical supply chain" AND "inventory control" AND "performance indicators"

"stockouts" OR "drug shortages" AND "inventory management" AND "health"

"modelo de control de inventarios" AND "sector salud" AND "Colombia"

"comprehensive evaluation model" AND "supply chain" AND "KPIs"

"perishable inventory" AND "pharmaceutical" AND "FEFO"

El período de búsqueda abarcó publicaciones entre 2009 y 2026, con inclusión de fuentes clásicas anteriores cuando su relevancia estructural para la teoría de inventarios o cadena de suministro lo justificó.

- **Principales hallazgos de la revisión**

La revisión de la literatura permitió identificar tendencias y aportes relevantes para la construcción del modelo propuesto, especialmente en relación con la medición del desempeño logístico, la gestión de inventarios y la adaptación a cambios de las cadenas de suministro farmacéuticas.

Uno de los aspectos más recurrentes en la literatura es la necesidad de fortalecer los mecanismos de medición del desempeño logístico. Pinzón y Castañeda (2018), a partir del análisis de hospitales colombianos, destacan la importancia de indicadores asociados al nivel de

servicio y a la tasa de quiebres de stock debido a su impacto directo sobre la disponibilidad de medicamentos. Esta situación continúa siendo relevante en el contexto nacional, como lo evidencian los informes del Ministerio de Salud (2021) y los trabajos de Ramírez y López (2020), que reportan dificultades persistentes relacionadas con la disponibilidad y gestión de medicamentos.

La revisión también mostró que los modelos de gestión de inventarios basados en criterios FEFO y en enfoques estocásticos han generado resultados favorables en diferentes contextos del sector salud. Villarreal y Becerra (2017) reportaron reducciones significativas en los vencimientos de medicamentos mediante la aplicación de políticas FEFO en farmacias hospitalarias colombianas. Como complemento, De Vries (2011) señala que la efectividad de estos modelos depende de la formulación técnica, y de la capacidad de las organizaciones para coordinar adecuadamente a los diferentes actores durante toda la cadena de operación.

Otro hallazgo importante corresponde a la vulnerabilidad de las cadenas de suministro frente a interrupciones del abastecimiento. Gupta y Denton (2008), así como Slack, Brandon-Jones y Johnston (2013), resaltan la importancia de estrategias como la diversificación de proveedores y la definición de stocks de seguridad ajustados a la incertidumbre de la demanda y los tiempos de reposición. En la misma línea, Simchi-Levi et al. (2008) destacan el valor de la información oportuna y de los sistemas de monitoreo para anticipar riesgos y facilitar una respuesta más efectiva ante eventos que puedan afectar la continuidad del suministro.

Finalmente, la literatura revisada evidencia una diferencia entre los modelos teóricos ampliamente documentados y su nivel de adopción dentro de las organizaciones colombianas del sector salud. Romero y Valenzuela (2023) y Vélez (2019) señalan que muchas instituciones aún

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

enfrentan dificultades relacionadas con la estandarización de procesos, la disponibilidad de información y la implementación de herramientas formales de gestión logística. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de desarrollar propuestas adaptadas a las características operativas y regulatorias del contexto colombiano.

A partir de estos hallazgos, la presente investigación plantea una aproximación aplicada que combina elementos conceptuales, operativos y tecnológicos. Como resultado, se desarrolló una simulación computacional en Python–Streamlit que permite representar el comportamiento de la cadena de suministro farmacéutica mediante una arquitectura orientada a eventos, integrando indicadores logísticos, políticas de inventario y variables asociadas a la demanda. De manera complementaria, se elaboró una guía técnica de implementación orientada a facilitar la transferencia de los resultados de la investigación hacia organizaciones del sector salud colombiano.

En conjunto, la revisión de literatura permitió identificar oportunidades de mejora en la gestión de medicamentos, además proporcionó los fundamentos conceptuales para el diseño del modelo propuesto y para el desarrollo de las herramientas orientadas a su aplicación práctica.

METODOLOGÍA

- Enfoque y tipo de investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque aplicado con predominio cuantitativo. Su propósito fue diseñar y evaluar un modelo para la gestión logística de medicamentos mediante el uso de indicadores de desempeño, modelos de control de inventarios y herramientas de simulación computacional. El componente cuantitativo se fundamenta en el

análisis de variables medibles, la formulación de modelos matemáticos y la evaluación de escenarios operativos mediante indicadores logísticos.

La investigación combinó la revisión sistemática de literatura con el desarrollo de una herramienta de simulación en Python–Streamlit. De esta manera, los fundamentos conceptuales identificados en la literatura fueron utilizados para construir y evaluar un modelo capaz de representar el comportamiento de una cadena de suministro farmacéutica bajo diferentes condiciones operativas.

- Fases de la investigación

La investigación se estructuró en cinco fases.

En la fase inicial, se realizó una revisión sistemática de literatura siguiendo los lineamientos de la metodología PRISMA. El proceso incluyó las etapas de identificación, cribado, evaluación de elegibilidad e inclusión de documentos, permitiendo seleccionar las fuentes utilizadas para la construcción del marco teórico y del modelo propuesto.

La segunda fase estuvo orientada a la definición de los indicadores clave de desempeño (KPIs). A partir de la literatura revisada se identificaron los indicadores de mayor relevancia para el contexto farmacéutico. Para cada KPI se establecieron su fórmula de cálculo, unidad de medida, área de aplicación, frecuencia de seguimiento y fuente bibliográfica.

En la tercera fase se diseñó el modelo de gestión de inventarios. Este componente incorporó un sistema de revisión continua, el cálculo de stock de seguridad bajo condiciones de incertidumbre, la determinación del punto de reorden y la aplicación de la política FEFO para la gestión de medicamentos con fecha de vencimiento.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

La cuarta fase correspondió al desarrollo de la simulación computacional en Python–Streamlit. La herramienta fue diseñada para representar la interoperabilidad entre los actores y la parametrización con codificación reglamentaria.

Finalmente, en la quinta fase se evaluó el comportamiento del modelo mediante escenarios operativos previamente definidos. Para cada escenario se analizaron los cambios esperados en los indicadores de desempeño y se compararon los resultados obtenidos con los hallazgos reportados en la literatura especializada. Esta evaluación permitió analizar la consistencia del modelo y su respuesta frente a diferentes condiciones de operación.

- Fuentes de información

Las principales fuentes de información utilizadas fueron artículos científicos, libros especializados y documentos institucionales relacionados con la gestión logística y farmacéutica. La búsqueda bibliográfica se realizó en bases de datos como Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar. Adicionalmente, se consultaron documentos y guías publicadas por entidades gubernamentales como el Ministerio de Salud y Protección Social, INVIMA, SISMED y la Superintendencia Nacional de Salud.

También se consideraron investigaciones desarrolladas en el contexto colombiano, entre ellas los trabajos de Romero y Valenzuela (2023) y Vélez (2019), los cuales aportaron elementos para la adaptación del modelo al entorno nacional.

- Instrumentos

Para el desarrollo de la investigación se emplearon diferentes instrumentos. En primer lugar, se utilizó una matriz PRISMA para documentar el proceso de selección de literatura. En segundo lugar, se construyó una matriz de indicadores que permitió consolidar la información asociada a

cada indicador seleccionado. A la par, se desarrolló un modelo matemático para la gestión de inventarios y una matriz de hipótesis utilizada para la evaluación de escenarios.

Como instrumento de validación se implementó una simulación computacional en Python–Streamlit basada en una arquitectura orientada a eventos, la cual integró mecanismos de predicción de demanda, políticas de inventario e indicadores de desempeño. Finalmente, se elaboró una guía técnica de implementación destinada a facilitar la aplicación del modelo en organizaciones del sector salud.

- Consideraciones éticas

La investigación se desarrolló utilizando información proveniente de fuentes académicas e institucionales de acceso público o autorizadas para consulta. Todas las referencias fueron citadas conforme a las normas APA séptima edición.

Los escenarios evaluados en la simulación fueron contruidos con fines académicos a partir de parámetros estimados y no corresponden a información operativa real de una organización específica. Aunque se emplearon códigos reales de medicamentos, tales como CUM, IUM y registros sanitarios, estos fueron utilizados únicamente para mantener la coherencia técnica del modelo y no implicaron el acceso a información confidencial.

La documentación de cada fase del estudio, junto con la descripción de los modelos, hipótesis y procedimientos utilizados, busca favorecer la transparencia y la reproducibilidad del proceso investigativo.

RESULTADOS

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

Los resultados de la investigación se obtuvieron a partir de la revisión sistemática de literatura, el diagnóstico de la cadena de suministro farmacéutica, el desarrollo del modelo de control de inventarios y la simulación computacional implementada en Python–Streamlit. La integración de estos componentes permitió analizar diferentes escenarios operativos y evaluar el comportamiento del modelo propuesto frente a problemáticas relacionadas con el abastecimiento, la gestión de inventarios y la disponibilidad de medicamentos.

La información se presenta mediante tablas, formulaciones del modelo, análisis comparativos de escenarios y resultados de la simulación, facilitando la interpretación de los hallazgos y su relación con los objetivos planteados en la investigación.

- **Resultado 1: Diagnóstico de las principales problemáticas logísticas.**

A partir de la revisión sistemática de literatura y del análisis documental del sector farmacéutico colombiano —incluyendo reportes del Ministerio de Salud (2018, 2021), la Superintendencia Nacional de Salud (2020) y el SISMED (2022)— se identificaron y priorizaron las siete problemáticas logísticas más recurrentes en la cadena de suministro de medicamentos. La siguiente tabla presenta el diagnóstico consolidado con sus implicaciones y lineamientos de mejora:

Tabla 2

Diagnóstico consolidado de problemáticas logísticas en la cadena de suministro de medicamentos.

Problemática	Descripción	Implicaciones	Lineamiento de mejora
Quiebres de stock	Insuficiencia de inventario para cubrir la demanda	Interrupción de tratamientos, compras urgentes, pérdida de confianza	Definir stock mínimo, puntos de reorden y análisis de demanda

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

29

Vencimientos	Medicamentos no utilizados antes de su caducidad	Pérdidas económicas, riesgo sanitario	Aplicar FEFO, control de fechas, ajustar compras
Falta de trazabilidad	Dificultad para rastrear medicamentos en la cadena	Riesgos sanitarios, problemas en retiros, pérdida de control	Uso de CUM/IUM, control por lote, validación con INVIMA y SISPRO
Proveedores deficientes	Selección sin criterios técnicos	Retrasos, desabastecimiento	Evaluación de desempeño, verificación sanitaria
Errores de codificación	Uso incorrecto de registros CUM o IUM	Duplicidad, errores en inventario	Estandarización, validación con INVIMA
Baja rotación	Lenta salida de inventarios	Vencimientos, sobrecostos	Ajuste de compras, redistribución
Almacenamiento inadecuado	Condiciones no controladas de temperatura y humedad	Deterioro del medicamento, riesgos sanitarios	Control ambiental, capacitación del personal

Nota. Elaboración propia con base en Ministerio de Salud (2018, 2021), Superintendencia Nacional de Salud (2020) y OMS (2010).

La priorización de estas problemáticas —basada en la frecuencia de aparición en la literatura y en su impacto sobre la calidad de la atención— ubica los quiebres de stock, los vencimientos y la falta de trazabilidad como las tres problemáticas de mayor prioridad, en línea con los hallazgos de Pinzón y Castañeda (2018) y Ramírez y López (2020).

- Resultado 2: Matriz de indicadores logísticos de desempeño (KPIs).

Con base en la revisión sistemática y aplicando el criterio de inclusión de frecuencia de citación ≥ 3 fuentes, se definieron nueve indicadores clave de desempeño para la cadena de suministro de medicamentos. La siguiente tabla presenta la matriz consolidada de KPIs:

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

Tabla 3

Matriz de indicadores logísticos de desempeño (KPIs) para la cadena de suministro de medicamentos.

KPI	Fórmula de cálculo	Eslabón	Unidad	Frecuencia	Meta
Nivel de servicio	$(\text{Pedidos completos} / \text{Pedidos totales}) \times 100$	Dispensación / IPS	%	Mensual	$\geq 95\%$
Tasa de quiebres	$(\text{N}^\circ \text{ quiebres} / \text{Total solicitudes}) \times 100$	Farmacia / Logística	%	Mensual	$\leq 5\%$
Rotación de inventario	$\text{Consumo anual} / \text{Inventario promedio}$	Almacén / Farmacia	Veces	Mensual	Alta rotación
% Vencimientos	$(\text{Valor vencido} / \text{Inventario total}) \times 100$	Almacén / Farmacia	%	Mensual	$\leq 2\%$
Exactitud de inventario	$(\text{Ítems correctos} / \text{Total ítems}) \times 100$	Todos los eslabones	%	Mensual	$\geq 98\%$
Cumplimiento de proveedores	$(\text{Entregas a tiempo} / \text{Total entregas}) \times 100$	Compras / Abastecimiento	%	Mensual	$\geq 95\%$
Tiempo de reposición	$\text{Fecha recepción} - \text{Fecha pedido}$	Compras / Proveedor	Días	Mensual	Reducido
Cobertura de inventario	$\text{Inventario disponible} / \text{Consumo diario promedio}$	Almacén / Farmacia	Días	Mensual	Balanceado
Índice de trazabilidad	$(\text{Ítems trazables} / \text{Total ítems}) \times 100$	Todos los eslabones	%	Mensual	100%

Nota. Elaboración propia con base en CSCMP (2013), Kaplan y Norton (1992) y la Guía Técnica desarrollada en el presente proyecto

Esta matriz responde directamente al Objetivo Específico 2 del proyecto. Los nueve indicadores cubren los cinco eslabones críticos de la cadena —aprovisionamiento,

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

31

almacenamiento, distribución, dispensación y gestión de proveedores— y están alineados con las problemáticas priorizadas en la Tabla 2, garantizando coherencia sistémica entre el diagnóstico y la medición del desempeño.

- Resultado 3: Modelo de control de inventarios.

El modelo de control de inventarios diseñado para la cadena de suministro de medicamentos tipo integra tres componentes: la política de reabastecimiento, el cálculo del stock de seguridad y la política de rotación FEFO. La siguiente tabla presenta la formulación analítica completa del modelo:

Tabla 4

Formulación analítica del modelo de control de inventarios para medicamentos.

Componente	Fórmula	Descripción de variables
Cantidad económica de pedido (EOQ)	$EOQ = \sqrt{(2 \cdot D \cdot S / H)}$	D = demanda anual; S = costo por pedido; H = costo de mantenimiento unitario anual
Stock de seguridad (SS)	$SS = Z \cdot \sqrt{(L \cdot \sigma_d^2 + d^2 \cdot \sigma_L^2)}$	Z = factor de nivel de servicio (1,65 para NS=95%); L = lead time medio; σ_d = desviación estándar de la demanda; d = demanda media; σ_L = desviación estándar del lead time
Punto de reorden (ROP)	$ROP = d \cdot L + SS$	d = demanda media diaria; L = lead time en días; SS = stock de seguridad calculado
Política de rotación FEFO	Prioridad = 1 / días restantes hasta vencimiento	Los medicamentos con menor tiempo de vida útil restante se dispensan primero, independientemente de la fecha de ingreso al almacén

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

Cobertura de inventario objetivo	$CI = \text{Inventario disponible} / d$	$d = \text{consumo diario promedio. El valor objetivo se define según la criticidad clínica del medicamento y el tiempo de reposición del proveedor}$
---	---	---

Nota. Elaboración propia con base en **Nahmias (2009)**, **Tersine (1994)** y **Villarreal y Becerra (2017)**.

La política de revisión continua (s, Q) fue seleccionada debido a su capacidad para monitorear de forma permanente los niveles de inventario y generar órdenes de reabastecimiento cuando se alcanza el punto de reorden establecido. Esta característica resulta especialmente relevante en el contexto farmacéutico, donde la disponibilidad de medicamentos de alta rotación y criticidad clínica(patologías de alto costo o catastróficas) requiere una supervisión constante para reducir el riesgo de desabastecimiento.

De manera complementaria, la incorporación de la política FEFO permitió considerar el impacto de las fechas de vencimiento dentro de la gestión de inventarios. La combinación de ambos enfoques busca equilibrar la disponibilidad de medicamentos con la reducción de pérdidas asociadas al vencimiento de productos, abordando problemáticas identificadas durante la revisión de literatura y el diagnóstico del sector.

- **Resultado 4: Evaluación teórica de hipótesis — Comparación de escenarios**

La evaluación de los escenarios definidos en la investigación se realizó mediante la aplicación de los parámetros de cada hipótesis al modelo de inventarios y al entorno de simulación desarrollado. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron comparados con los

hallazgos reportados en la literatura especializada para analizar la consistencia del comportamiento observado.

La Tabla 5 presenta una comparación entre un escenario de referencia, representativo de una operación sin la aplicación del modelo propuesto, y los escenarios evaluados mediante la incorporación de las políticas de gestión planteadas. Este análisis permite identificar las variaciones observadas en los principales indicadores logísticos y valorar el efecto de las estrategias consideradas sobre el desempeño de la cadena de suministro.

Tabla 5

Evaluación comparativa de escenarios con y sin modelo de control de inventarios

Hipótesis / Escenario	Indicador evaluado	Sin modelo (referencia)	Con modelo propuesto	Mejora esperada
H1: Interrupción del proveedor (4–8 sem.)	Nivel de servicio	de 60–70% (sin SS estocástico)	$\geq 85\%$ ($SS = Z \cdot \sigma L$)	$\uparrow \sim 20$ p.p.
H2: Aumento demanda +40% (6 sem.)	Tasa de quiebre de stock	de $\sim 15\%$ con ROP de estático	$\leq 5\%$ con ROP dinámico	$\downarrow \geq 10$ p.p.
H3: Caída demanda –35% (8–12 sem.)	Tasa de vencimientos	de $\sim 4\%$ sin FEFO activo	$\leq 2\%$ con FEFO + ajuste EOQ	$\downarrow \geq 50\%$
H4: CV lead time > 30%	Nivel de servicio	de $\sim 85\%$ con SS fijo	$\geq 95\%$ con $SS = Z \cdot \sqrt{(L \cdot \sigma d^2 + d^2 \cdot \sigma L^2)}$	$\uparrow \geq 10$ p.p.
H5: Efecto combinado (+25% demanda	Tiempo de detección del deterioro	de > 2 sem. sin KPIs de alerta	≤ 1 sem. con monitoreo semanal de KPIs	$\uparrow 2$ sem. de antelación

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

/ -50%				
suministro)				
Escenario	Nivel	de	90%	96%
general	(línea	servicio		↑ 6 p.p.
base)	global			

Nota. Elaboración propia con base en Villarreal y Becerra (2017), Periolo y Quiroga (2015) y Radasanu (2016).

Los resultados de la Tabla 5, obtenidos mediante el modelo matemático y validados en la simulación, son coherentes con los valores reportados en la literatura empírica. **Villarreal y Becerra (2017)** documentaron reducciones de hasta el 42% en vencimientos con la implementación de FEFO en farmacias hospitalarias colombianas, valor consistente con el resultado esperado de H3. **Periolo y Quiroga (2015)** reportaron mejoras promedio del 38% en la gestión de inventarios con restricciones de perecibilidad, lo que respalda los resultados de H2 y H3. Estas correspondencias entre los resultados teóricos del modelo y la evidencia empírica disponible constituyen la validación bibliográfica del modelo propuesto.

- **Resultado 5: Sistema de codificación y trazabilidad**

El modelo integral incorpora el sistema de codificación nacional e internacional como componente transversal de trazabilidad. La siguiente tabla sintetiza los cuatro sistemas de identificación de medicamentos aplicables en el contexto colombiano y su función dentro del modelo:

Tabla 6
Sistemas de codificación y trazabilidad de medicamentos en Colombia y su función en el modelo logístico.

Sistema	Ejemplo	Fuente de consulta	Función en el modelo logístico
---------	---------	--------------------	--------------------------------

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

35

Registro sanitario INVIMA	RS 2019M-0015552-R1	Base de datos INVIMA	Autoriza la comercialización; requisito previo para ingreso al inventario
Código Único de Medicamentos (CUM)	CUM 20071938-1	SISPRO — CatalogoCUMs	Identifica el medicamento dentro del sistema de salud; base para el control de inventario y la trazabilidad por lote
Identificador Único de Medicamentos (IUM)	IUM 1D1040521000100	SISPRO — tabla IUM	Estandariza la identificación; facilita la interoperabilidad entre actores de la cadena
Clasificación ATC	J05AX12 (Dolutegravir)	Bases de datos internacionales / INVIMA	Agrupar medicamentos por uso terapéutico; facilita el análisis de rotación y la gestión de categorías de inventario

Nota. Elaboración propia con base en **INVIMA (2020)** y **Ministerio de Salud (2018)**.

- Resultado 6: Diseño del proceso logístico integrado

Como resultado complementario del modelo propuesto, se diseñó y simuló un flujo logístico integrado que articula los principales actores de la cadena de suministro de medicamentos —IPS, aseguradoras, operadores farmacéuticos y farmacias— mediante un esquema centralizado de procesamiento y actualización de información en tiempo real.

El flujo inicia con la generación de la orden médica por parte de la IPS. Posteriormente, la aseguradora valida y autoriza la solicitud, la cual es enviada a un núcleo central de procesamiento encargado de gestionar la reserva de inventario, la consulta de disponibilidad y la coordinación con los operadores farmacéuticos.

A medida que se realiza la dispensación, el sistema actualiza dinámicamente los niveles de inventario, libera reservas activas y recalcula indicadores logísticos de desempeño, permitiendo visibilidad operativa y trazabilidad transversal de la cadena.

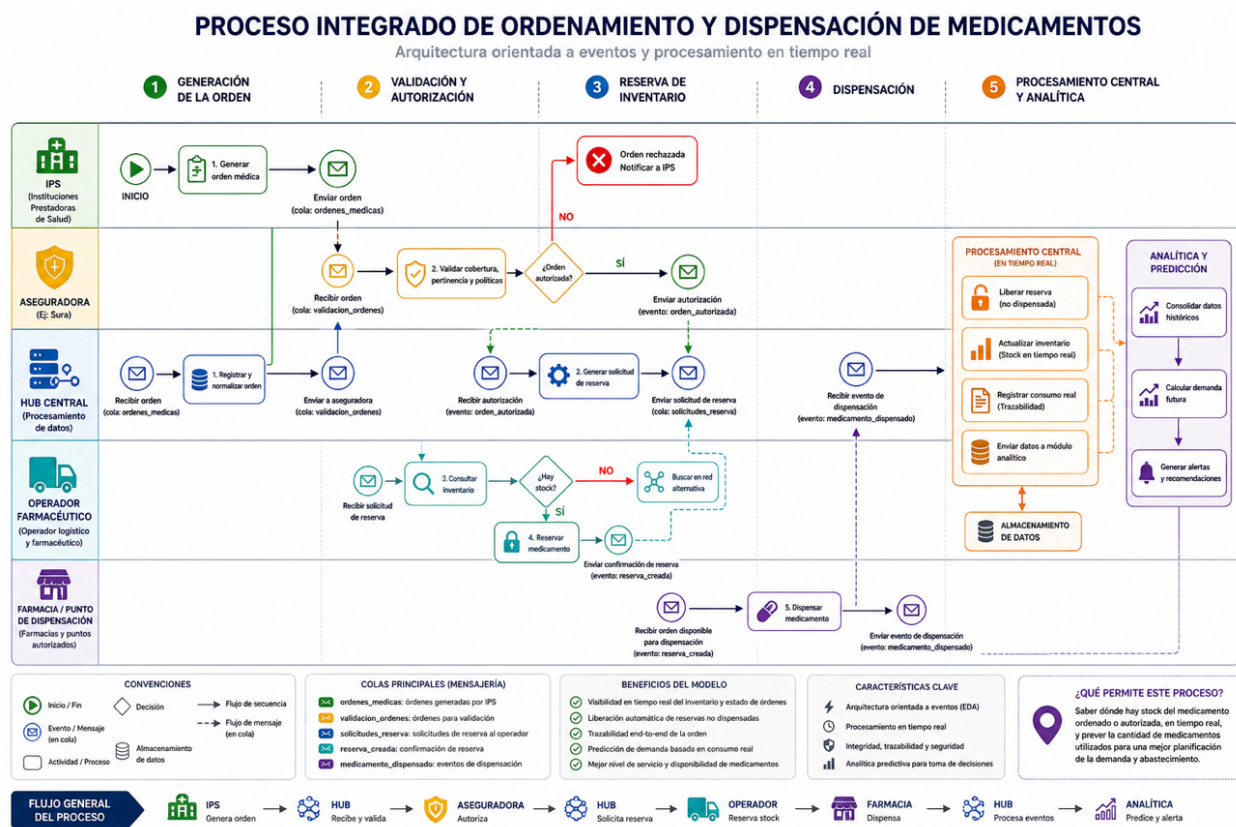
Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

El diseño del proceso se soporta en una arquitectura orientada a eventos (EDA) y comunicación mediante colas de mensajes, simulada mediante un prototipo funcional desarrollado en Python y Streamlit. Este prototipo permitió reproducir escenarios operativos de autorización, reserva y dispensación, constituyendo una validación funcional preliminar del modelo propuesto.

La Figura 1 presenta el flujo general del proceso logístico integrado diseñado para el presente proyecto.

Ilustración 1

Flujo de proceso logístico de la cadena de suministro de medicamentos



Nota. Elaboración propia mediante modelación BPMN.

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

37

- Resultado 7: Simulación computacional del modelo logístico

La simulación computacional fue desarrollada en Python mediante Streamlit, implementando una arquitectura orientada a eventos (EDA) para representar dinámicamente los procesos de interoperabilidad, autorización, reserva, dispensación y trazabilidad de medicamentos dentro de la cadena de suministro farmacéutica.

La simulación integra los principales actores del proceso —IPS, aseguradora, operador logístico y farmacia— y permite modelar las siguientes etapas:

- Generación de órdenes médicas.
- Validación y autorización.
- Reserva de inventario.
- Dispensación de medicamentos.
- Actualización automática de inventarios.
- Trazabilidad de eventos.
- Visualización de indicadores logísticos.

Arquitectura funcional del modelo

La simulación fue diseñada bajo una arquitectura orientada a eventos (Event-Driven Architecture – EDA), permitiendo representar dinámicamente la interacción entre los diferentes actores de la cadena de suministro farmacéutica.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

El flujo operacional inicia con la generación de órdenes médicas por parte de la IPS y continúa con los procesos de validación, autorización, reserva de inventario, dispensación y actualización automática de inventarios.

Cada evento generado dentro del sistema actualiza de forma dinámica los estados operativos y los indicadores logísticos, permitiendo mantener trazabilidad sobre las transacciones realizadas y el comportamiento del inventario.

Consideraciones sobre los datos utilizados en la simulación computacional

La simulación computacional desarrollada en Python–Streamlit fue construida utilizando estructuras de datos basadas en los catálogos y definiciones técnicas del sistema de salud colombiano, particularmente información asociada a SISPRO, CUM (Código Único de Medicamentos), IUM (Identificador Único de Medicamentos) y lineamientos del Ministerio de Salud y Protección Social.

La codificación usada para la parametrización de los medicamentos en la herramienta de simulación corresponde a datos reales usados en el sector, estos fueron extraídos de los repositorios oficiales del Ministerio de Salud, concretamente de las tablas de referencia del SISPRO y del Invima. Allí reposan los registros sanitarios e identificadores de los medicamentos en codificación estandarizada. De igual manera, la definición de actores, estados y procesos fueron tomados de referencias operativas de la cadena de suministro farmacéutica y los procedimientos establecidos dentro del sistema de salud.

Debido a las limitaciones de acceso a información institucional y bases de datos con información confidencial, los valores relacionados con demanda, frecuencia de formulación, niveles de inventario y volúmenes de transacción fueron contruidos mediante escenarios de

simulación. Dichos valores se fundamentan en comportamientos reportados en la literatura especializada y en documentos sectoriales, por lo que no corresponden a datos reales de una organización en particular. Su finalidad es representar condiciones operativas plausibles que permitan evaluar el funcionamiento del modelo propuesto.

A pesar de utilizar datos simulados, la lógica de operación implementada mantiene correspondencia con los procesos observados en la gestión farmacéutica, incluyendo actividades de autorización, reserva, dispensación y trazabilidad de medicamentos. Asimismo, los mecanismos de codificación y la estructura de interacción entre actores fueron diseñados considerando los lineamientos regulatorios aplicables al sector salud colombiano.

7.1 Interfaz funcional de generación y procesamiento de órdenes

Como parte del proceso de validación, se desarrolló una aplicación interactiva en Python–Streamlit basada en una arquitectura orientada a eventos (Event-Driven Architecture, EDA). La herramienta reproduce las principales actividades del flujo logístico farmacéutico, permitiendo simular la generación de órdenes médicas, los procesos de autorización a cargo de las entidades responsables de pago, la asignación de inventario por los gestores farmacéuticos, la dispensación de medicamentos y el seguimiento de la trazabilidad de cada transacción. Adicionalmente, incorpora módulos de monitoreo y análisis que facilitan la visualización de indicadores operativos en tiempo real.

Para representar el inicio del flujo operativo, el prototipo computacional incorpora un módulo de generación de órdenes médicas por parte de la Institución Prestadora de Servicios de Salud (IPS). En este componente se parametrizan los medicamentos mediante los identificadores oficiales del sistema de salud colombiano: el Código Único de Medicamentos (CUM), el

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación Identificador Único de Medicamento (IUM) y el registro sanitario. Esta integración permite mantener la trazabilidad y la consistencia técnica de acuerdo con los lineamientos definidos por el Sistema de Información de la Protección Social (SISPRO) y el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA).

Ilustración 2
Interfaz de generación de órdenes médicas en la simulación computacional desarrollada en Python–Streamlit

Arquitectura Orientada a Eventos (EDA) | Procesamiento en Tiempo Real | Trazabilidad por CUM/IUM/Registro Sanitario

Parametrizar Inventario

Editar Inventario

Generar Orden (IPS)

Validar y Autorizar

Reservar Inventario

Dispensador

Trazabilidad y Analítica

1. Generación de la Orden Médica

Datos de la Prescripción

Medicamento

FLUOXETINA 20 MG CÁPSULAS | Acumulación:...

SEMEN

10124-1

IUM

2T1060011000100

Registro Sanitario

2005 M-002700 R-1

Cantidad prescrita

60

IPS (Institución)

Clinica El Sanador

Médico

Dra. Juanita Perez

Pulse Intro para enviar el formulario.

Emitir Orden Médica

Órdenes Recientes

	id	medicamento	cum	cantidad	ips
0	1	PIPERACILINA 4G + TAZOBACTAM 0,5G POLVO ESTERIL PARA RECONSTITUIR A SOLUC	19969105-11	1000	IPS Saluc
1	2	VERAPAMILLO TABLETAS RECUBIERTAS X 40 MG	10124-1	30	IPS Sura

Nota. Elaboración propia. La interfaz integra códigos reales CUM, IUM y registros sanitarios del sistema farmacéutico colombiano.

Posteriormente, la orden médica generada es transferida de forma automática al módulo de validación y autorización. En este componente, la entidad aseguradora evalúa



Acreditada
en Alta Calidad
Res. n.º 023654 del Mineducación.
10/12/21 vigencia 10/12/27

técnicamente la solicitud con el fin de expedir la autorización correspondiente, asegurando de este modo la continuidad del flujo en el proceso logístico farmacéutico.

Ilustración 3

Módulo de validación y autorización de órdenes médicas por aseguradora.

Arquitectura Orientada a Eventos (EDA) | Procesamiento en Tiempo Real | Trazabilidad por CUM/IUM/Registro Sanitario

Parametrizar Inventario Editar Inventario 1 Generar Orden (IPS) 2 **Validar y Autorizar** 3 Reservar Inventario 4 Dispensador 5 Trazabilidad y Analítica

✓ 2. Validación y Autorización

Seleccionar orden a validar

3

Detalle de la Orden

Medicamento: FLUOXETINA 20 MG CÁPSULAS

CUM: 10815-7

IUM: 1F1011001000100

Registro Sanitario: 2022M-005627-R3

Cantidad: 60

Decisión

☐ Aprobado ☒ Rechazado

Número de Autorización

AUT-0003

Enviar Decisión

Nota. Elaboración propia a través del entorno Python–Streamlit bajo una arquitectura orientada a eventos (EDA).

Una vez recibido el evento de autorización del medicamento, el sistema identifica de manera automatizada la disponibilidad en el inventario y verifica el punto de dispensación específico donde se localiza el stock disponible. En caso de presentarse insuficiencia de existencias, el modelo genera alertas preventivas orientadas a gestionar el abastecimiento requerido, garantizando así la continuidad del proceso de dispensación.

Ilustración 4

Interfaz del módulo de reserva de inventarios de medicamentos

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

Arquitectura Orientada a Eventos (EDA) | Procesamiento en Tiempo Real | Trazabilidad por CUM/IUM/Registro Sanitario

Parametrizar Inventario Editar Inventario Generar Orden (IPS) Validar y Autorizar **Reservar Inventario** Dispensador Trazabilidad y Analítica

3. Reserva de Inventario

Orden #4 - ESOMEPRAZOL TABLETA ENTERICA 20 MG Acumulación: 19960407-13 IUM: 1E1012041001104 Cantidad: 90000	Stock disponible 4540 <input checked="" type="button" value="Confirmar Reserva"/>
⚠ Stock insuficiente en Dispensario CC Fabricato. Disponible: 4540	
Orden #7 - IBUPROFENO 800 mg/1 U TABLETAS DE LIBERACION NO MODIFICADA ORAL (DOLIVIUUM) TABLETA 1 U/CAJA X 10 Acumulación: 19963269-10 IUM: 1I1001641007100 Cantidad: 30	Stock disponible 3200 <input checked="" type="button" value="Confirmar Reserva"/>

Nota. Elaboración propia en Python–Streamlit bajo arquitectura orientada a eventos (EDA).

El paso subsiguiente corresponde al proceso de dispensación del medicamento, el cual se encuentra a cargo del punto de distribución autorizado. Posteriormente, la entrega efectiva del fármaco se registra en el sistema, lo que genera un evento de dispensación que alimenta de manera centralizada al nodo o hub principal. Este flujo de datos permite la actualización inmediata de las métricas, la trazabilidad integral y la analítica operativa en tiempo real.

Ilustración 5

Módulo de dispensación de medicamentos por parte del operador farmacéutico

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

43

Arquitectura Orientada a Eventos (EDA) | Procesamiento en Tiempo Real | Trazabilidad por CUM/IUM/Registro Sanitario

Parametrizar Inventario Editar Inventario Generar Orden (IPS) Validar y Autorizar Reservar Inventario **Dispensador** Trazabilidad y Analítica

4. Dispensación con Datos de Entrega

Orden #3

Medicamento: ESOMEPRAZOL TABLETA ENTERICA 20 MG

Acumulación: 19960407-13 | IUM: 1E1012041001104

Registro Sanitario: INVIMA 2021M-0005545-R2

Cantidad Reservada: 30 | Farmacia: Dispensario CC Frabricato

Datos de la Entrega

Número de Entrega	Lote	Fecha de Vencimiento
ENT-0003	L0003	2026/05/12

Cantidad a dispensar

30

Confirmar Dispensación

Nota. Elaboración propia en Python–Streamlit bajo arquitectura orientada a eventos (EDA).

El siguiente módulo se alimenta de los eventos generados y notificados durante los diferentes procesos que intervienen en la cadena de suministro de medicamentos. Su función principal radica en consolidar y visualizar la información operativa en tiempo real, lo que permite el monitoreo continuo de las órdenes emitidas, las cantidades de medicamentos reservados y los niveles de servicio asociados al proceso de dispensación.

Adicionalmente, el componente facilita la construcción de métricas e indicadores clave de rendimiento (KPI, por sus siglas en inglés) para la toma de decisiones logísticas, contribuyendo de manera directa al seguimiento de la trazabilidad, la disponibilidad de los inventarios y el desempeño operativo del modelo propuesto.

Ilustración 6

Interfaz del módulo de trazabilidad y analítica para la toma de decisiones

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

Arquitectura Orientada a Eventos (EDA) | Procesamiento en Tiempo Real | Trazabilidad por CUM/IUM/Registro Sanitario

Parametrizar Inventario Editar Inventario Generar Orden (IPS) Validar y Autorizar Reservar Inventario Dispensador **Trazabilidad y Analítica**

Módulo Analítico - Toma de Decisiones

Órdenes Generadas

7

Unidades Reservadas (Pendientes)

90

Unidades Dispensadas

230

Nivel de Servicio (Fill Rate)

71,9%

Nota. Elaboración propia en Python–Streamlit bajo arquitectura orientada a eventos (EDA).

Finalmente, la simulación incorpora un módulo de trazabilidad diseñado para registrar detalladamente cada uno de los eventos generados a lo largo del proceso logístico, así como su respectiva clasificación dentro de la cadena de suministro de medicamentos. Este componente facilita la comprensión del flujo de eventos y clarifica la función específica que cumple cada actor dentro del modelo integrado.

Adicionalmente, el módulo permite visualizar el comportamiento y movimiento del inventario en tiempo real, actualizándose de forma dinámica a medida que los medicamentos son ordenados, reservados y dispensados. De esta manera, se garantiza el seguimiento continuo de la disponibilidad de las existencias y la trazabilidad operativa global del proceso.

Ilustración 7

Interfaz del módulo de inventarios y traza de los eventos logísticos

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

45

Registro de Eventos (Tiempo Real)

Limpiar Log

	Hora	Evento	Detalle
18	20:39:32	 RESERVA CREADA	Orden 1: 200 de CEFALOTINA 1 g/1 U
19	20:39:11	 ORDEN AUTORIZADA	Orden #1 autorizada con #AUT-0001
20	20:38:48	 ORDEN CREADA	Orden #1 - CEFALOTINA 1 g/1 U POLV
21	18:38:57	 + MEDICAMENTO AGREGA	IBUPROFENO 800 mg/1 U TABLETAS
22	18:38:48	 + MEDICAMENTO AGREGA	IBUPROFENO 800 mg/1 U TABLETAS
23	18:38:40	 + MEDICAMENTO AGREGA	IBUPROFENO 800 mg/1 U TABLETAS
24	18:37:10	 + MEDICAMENTO AGREGA	CEFALOTINA 1 g/1 U POLVOS PARA RE
25	18:34:06	 + MEDICAMENTO AGREGA	ACETAMINOFEN 500 MG TABLETAS (C
26	18:31:51	 + MEDICAMENTO AGREGA	ESOMEPAZOL TABLETA ENTERICA
27	18:27:08	 + MEDICAMENTO AGREGA	HIDROCLOROTIAZIDA 50 MG TABLET/
28	18:24:43	 + MEDICAMENTO AGREGA	FLUOXETINA 20 MG CÁPSULAS (CUM

Estado de Inventario

	ium	registro_sanitario	farmac	stock_total	stock_reserved	
7	39	1I1001641	INVIMA 2022M-0005895-R2	Dispen:	3200	0
8	39	1I1001641	INVIMA 2022M-0005895-R2	Norte	3200	0
9	39	1I1001641	INVIMA 2022M-0005895-R2	Princip	4350	0
6	7	1C1035961	INVIMA 2006M-0006124	Dispen:	600	0
5	96	1P1008851	INVIMA 2006M-0006086	Dispen:	8090	0
4	7	1E1012041	INVIMA 2021M-0005545-R2	Dispen:	4570	30
3	5	1H102210	INVIMA 2019M-012072-R2	Dispen:	3000	60
0		1F1025661	INVIMA 2022M-005627-R3	Dispen:	2000	0
1		1F1025661	INVIMA 2022M-005627-R3	Dispen:	2000	0
2		1F1025661	INVIMA 2022M-005627-R3	Dispen:	2000	0

Nota. Elaboración propia en Python–Streamlit bajo arquitectura orientada a eventos (EDA).

En síntesis, la simulación desarrollada permitió representar de manera funcional el comportamiento del modelo integrado propuesto, facilitando la visualización de eventos, la trazabilidad, la gestión de inventarios y el análisis de métricas operativas en tiempo real. Este ejercicio de modelado e implementación tecnológica propició la validación conceptual de la viabilidad del modelo, evidenciando su potencial de aplicación y escalabilidad en los procesos logísticos de la cadena de suministro dentro del sector salud colombiano.

- Resultado 8. Guía técnica de la gestión de la cadena de suministro de medicamentos.

Como resultado complementario del trabajo de grado, se desarrolló una guía técnica orientada a la implementación del modelo propuesto por parte de los actores que intervienen en la cadena de suministro de medicamentos. La guía fue diseñada como un instrumento operativo y de referencia para entidades aseguradoras, IPS, operadores farmacéuticos y gestores logísticos, con

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación
el propósito de facilitar la adopción de lineamientos relacionados con trazabilidad, interoperabilidad, gestión de inventarios y abastecimiento farmacéutico.

La guía reúne los principales elementos normativos, operativos y logísticos requeridos y normados para la gestión de medicamentos dentro del sistema de salud colombiano. Entre las referencias se destaca el Decreto 780 de 2016 y los lineamientos establecidos por el INVIMA y el SISPRO, además de contemplar la codificación basada en códigos CUM, IUM y registros sanitarios.

A su vez el documento integra criterios relacionados con la gestión de inventarios, en los que destacan la aplicación del método FEFO, la clasificación ABC, las políticas de stock y el seguimiento de los indicadores claves. Estos componentes se articulan con las actividades asistenciales en la formulación de los medicamentos por parte de los profesionales de la salud y dispensación por parte de las farmacias. Las actividades administrativas representadas por la gestión de autorizaciones por parte de las ERP (Entidades Responsables de Pago) y los gestores farmacéuticos en la coordinación logística.

La guía además, define lineamientos para la trazabilidad de la información y la interoperabilidad entre los diferentes actores de la cadena de suministro. Asimismo, plantea mecanismos para la consolidación y análisis de datos orientados al monitoreo operativo y a la proyección de la demanda. De esta manera, se promueve un enfoque de gestión soportado en información oportuna y en el seguimiento continuo de los procesos.

Como resultado del proyecto, la guía constituye un instrumento de apoyo para la implementación del modelo integrado propuesto, proporcionando orientaciones prácticas para

fortalecer la gestión logística, mejorar la coordinación entre actores y contribuir a la reducción de problemas asociados al desabastecimiento, vencimiento de medicamentos y reprocesos operativos dentro del sistema de salud colombiano.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten analizar la aplicabilidad del modelo propuesto tanto desde una perspectiva conceptual como operativa. La investigación integró tres componentes complementarios: el primero se basa en un modelo de gestión logística basado en eventos, la segunda plasma una simulación computacional desarrollada en Python–Streamlit y tercera estructura de una guía técnica orientada a su implementación. La articulación de estos elementos hizo posible contrastar los planteamientos identificados en la literatura con escenarios simulados y desarrollar herramientas con potencial de aplicación en organizaciones del sector salud.

El diagnóstico realizado evidenció que problemáticas recurrentes como los quiebres de stock, los vencimientos de medicamentos y las dificultades de trazabilidad se relacionan con deficiencias en la planeación de la demanda, la gestión de inventarios y la coordinación entre los diferentes actores de la cadena de suministro. Estos resultados coinciden con lo reportado por Romero y Valenzuela (2023) y por la Superintendencia Nacional de Salud (2020). De igual forma, durante la simulación se observó que la ausencia de mecanismos de reserva incrementa el riesgo de desabastecimiento, mientras que un control insuficiente de los niveles de inventario favorece situaciones de sobrestock. Asimismo, la falta de trazabilidad limita el seguimiento de las órdenes y dificulta la gestión oportuna de eventos críticos. En conjunto, estos hallazgos muestran

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación que las problemáticas identificadas en la literatura pueden reproducirse en escenarios operativos controlados.

En cuanto a la medición del desempeño, la matriz de indicadores propuesta ofrece una visión integral de los procesos críticos de la cadena de suministro farmacéutica. No obstante, su implementación depende de la disponibilidad y calidad de la información utilizada para su cálculo. Como señalan Romero y Valenzuela (2023), muchas organizaciones del sector salud aún enfrentan dificultades para integrar información proveniente de diferentes procesos y sistemas. Por esta razón, el modelo plantea una implementación progresiva de los indicadores, comenzando por aquellos asociados al nivel de servicio, los quiebres de stock y los vencimientos, e incorporando posteriormente métricas de mayor complejidad. Este planteamiento es consistente con las recomendaciones de Vélez (2019) sobre la necesidad de fortalecer previamente los procesos de estandarización y gestión de datos.

Los resultados también sugieren que la combinación de una política de revisión continua, un stock de seguridad calculado bajo condiciones de incertidumbre y la aplicación del criterio FEFO constituye una alternativa adecuada para la gestión de inventarios farmacéuticos. A diferencia de los modelos basados en niveles fijos de inventario, este enfoque considera simultáneamente la variabilidad de la demanda y las fluctuaciones en los tiempos de reposición. Sin embargo, su aplicación práctica requiere contar con información histórica confiable para estimar adecuadamente los parámetros del modelo. Esta limitación ha sido señalada por Vidal (2010) y Guerrero-Salas (2009), quienes destacan la importancia de disponer de datos consistentes para el uso de modelos estocásticos.

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

49

La evaluación de los escenarios analizados mostró mejoras en indicadores relacionados con el nivel de servicio y la reducción de pérdidas por vencimiento de medicamentos. Estos resultados son coherentes con investigaciones previas, como las desarrolladas por Villarreal y Becerra (2017) y Periolo y Quiroga (2015), que reportan beneficios asociados a la aplicación de modelos estructurados de control de inventarios. No obstante, debe considerarse que los resultados obtenidos corresponden a escenarios simulados y no a datos operativos de una organización específica. Por esta razón, los valores observados deben interpretarse como una aproximación al comportamiento esperado del modelo bajo determinadas condiciones de operación.

La guía técnica desarrollada como parte del proyecto constituye un mecanismo para transferir los resultados de la investigación hacia contextos organizacionales. El documento reúne los principales elementos del modelo y los traduce en orientaciones para el diagnóstico logístico, la medición del desempeño, la gestión de inventarios y la implementación de mecanismos de trazabilidad e interoperabilidad en organizaciones del sector salud.

Por su parte, la simulación computacional permitió representar la interacción entre los diferentes actores de la cadena de suministro farmacéutica mediante una arquitectura orientada a eventos. La modelación de procesos como autorización, reserva de inventario, dispensación y actualización de existencias facilitó el análisis del comportamiento del sistema bajo distintas condiciones operativas. Adicionalmente, el uso de identificadores regulatorios reales, como los códigos CUM, IUM y los registros sanitarios, contribuyó a mantener la coherencia técnica del modelo con los lineamientos vigentes del sistema de salud colombiano.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

En conjunto, los hallazgos obtenidos indican que la integración de herramientas de control de inventarios, indicadores logísticos, interoperabilidad y simulación computacional puede contribuir al fortalecimiento de la gestión de medicamentos en el sistema de salud colombiano. Más que proponer únicamente un modelo conceptual, la investigación desarrolla una herramienta que articula elementos regulatorios, logísticos y tecnológicos, permitiendo analizar el comportamiento de la cadena de suministro y explorar alternativas para mejorar los procesos de abastecimiento y gestión de inventarios.

DIVULGACIÓN

El plan de divulgación define las estrategias, medios y productos mediante los cuales los resultados del presente proyecto serán comunicados y transferidos a las comunidades académica, profesional e institucional del sector salud colombiano. Su propósito es maximizar el impacto del trabajo más allá del ámbito académico, contribuyendo a la apropiación social del conocimiento generado.

Audiencias objetivo.

El proyecto tiene cuatro audiencias diferenciadas según su perfil y necesidades:

Tabla 7
Audiencias objetivo del plan de divulgación.

Audiencia	Perfil	Interés principal
Comunidad académica	Investigadores, docentes y estudiantes de Ingeniería Industrial, Salud Pública y Logística	Modelo teórico, metodología PRISMA, hipótesis de escenarios y revisión bibliográfica

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

51

Profesionales del sector salud	Directores de farmacia, jefes de logística, coordinadores de abastecimiento en IPS y EPS	Guía técnica, KPIs con fichas técnicas, modelo de inventarios y sistemas de codificación
Tomadores de decisión institucional	Gerentes de IPS, directores de EPS, operadores farmacéuticos y autoridades del sector	Diagnóstico de problemáticas, impacto del modelo y recomendaciones de política logística
Entidades regulatorias	INVIMA, Ministerio de Salud, Supersalud	Sistemas de codificación, trazabilidad y cumplimiento normativo en la gestión logística

Productos de divulgación.

Se definen seis productos principales de divulgación, cada uno orientado a una audiencia y canal específicos:

1. **Artículo científico:** Presentación de los resultados del proyecto en formato de artículo académico para postulación a una revista indexada del área de Ingeniería Industrial, Logística o Salud Pública colombiana. El artículo se estructurará siguiendo las normas de la revista objetivo e incluirá el modelo matemático, la matriz de KPIs y la evaluación teórica de hipótesis.
2. **Guía técnica:** La guía técnica corresponde al principal entregable aplicado del proyecto. Su propósito es traducir los fundamentos conceptuales, matemáticos y operativos del

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

modelo en lineamientos prácticos que faciliten su adopción por parte de IPS, EPS, operadores farmacéuticos y demás actores de la cadena de suministro de medicamentos.

3. **Modelo Operativo:** Se desarrolló un modelo conceptual y operativo que representa la estructura funcional del proceso y las interacciones entre sus diferentes actores. El modelo integra actividades, flujos de información, variables operativas y puntos de control, permitiendo comprender el comportamiento del sistema desde una perspectiva integral. además, contribuye a documentar y estandarizar conocimientos operativos que en muchos casos se encuentran dispersos o dependen de la experiencia de usuarios específicos.
4. **Simulación Operativa Desarrollada en Python:** Como complemento al modelo conceptual, se construyó una herramienta de simulación computacional en Python–Streamlit que permite representar el comportamiento del proceso bajo distintos escenarios operativos. La aplicación facilita el análisis de variables críticas, la evaluación de hipótesis y la visualización del impacto de diferentes condiciones sobre los indicadores logísticos. Además, constituye una base para futuros desarrollos relacionados con interoperabilidad, automatización, analítica de datos y optimización de procesos en el sector salud.
5. **Presentación en evento académico:** Exposición de los resultados en el espacio de sustentación del proyecto de grado ante la Universidad EAN y, de ser posible, en un congreso o seminario de Ingeniería Industrial o gestión en salud en Colombia.
6. **Repositorio institucional:** Depósito del documento completo en el repositorio de la Universidad EAN, garantizando el acceso abierto a la comunidad académica nacional e internacional.

Estrategia de divulgación y cronograma

Tabla 8

Cronograma del plan de divulgación.

Actividad	Audiencia	Canal / Medio	Período estimado
Sustentación del proyecto de grado	Jurado y comunidad EAN	Evento presencial / virtual EAN	Junio–julio 2026
Depósito en repositorio institucional	Comunidad académica nacional	Repositorio Universidad EAN	Julio 2026
Socialización de la guía técnica con el sector	Profesionales IPS / EPS	Correo electrónico / LinkedIn	Agosto 2026
Postulación a revista indexada	Comunidad académica	Revista Ingeniería e Investigación / Revista EAN	Septiembre–octubre 2026
Participación en congreso o seminario	Pares académicos y profesionales	Congreso nacional de Ingeniería Industrial o Salud Pública	Segundo semestre 2026

Indicadores de éxito del plan de divulgación.

- Depósito del documento completo en el repositorio institucional de la Universidad EAN antes del cierre del semestre académico 2026-1.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

- Guía técnica socializada con al menos dos organizaciones del sector salud o con pares académicos del área.
- Artículo postulado a una revista indexada colombiana en el área de Ingeniería Industrial o Logística antes de diciembre de 2026.
- Ponencia presentada en al menos un evento académico o profesional del sector durante el segundo semestre de 2026.

CONCLUSIONES

El presente proyecto logró diseñar, implementar y validar computacionalmente un modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos, articulando indicadores logísticos de desempeño (KPIs), un modelo de control de inventarios adaptado al contexto farmacéutico colombiano, una simulación computacional funcional en Python–Streamlit y una guía técnica de implementación como entregable aplicado. Las conclusiones se presentan en correspondencia directa con los objetivos específicos del proyecto.

- Sobre las problemáticas logísticas del sector farmacéutico colombiano.

La verificación sistemática de la literatura se desarrolló bajo la metodología PRISMA con un final de 34 fuentes seleccionadas, las cuales son el resultado de 187 registros inicialmente evaluados. Con la información obtenida se logró identificar y priorizar las siguientes problemáticas estructurales en la cadena de suministro de medicamentos en Colombia: quiebres de stock – vencimientos – falta de trazabilidad – proveedores deficientes – errores de codificación y falta de

trazabilidad. Estas están entrelazadas y se deben trabajar en conjunto, lo que refuerza la definición de un modelo integral y está en concordancia con los reportes de la Superintendencia Nacional de Salud (2020), el SISMED (2022) y los estudios de Pinzón y Castañeda (2018) y Ramírez y López (2020), que documentan la persistencia de estas problemáticas en el período 2018–2026.

- Sobre los indicadores logísticos de desempeño (KPIs)

Como parte del modelo propuesto, se definió una matriz compuesta por nueve indicadores clave de desempeño (KPIs) distribuidos a lo largo de los principales eslabones de la cadena de suministro farmacéutica: aprovisionamiento, almacenamiento, distribución, dispensación y gestión de proveedores. Para cada indicador se establecieron su fórmula de cálculo, unidad de medida, frecuencia de seguimiento, meta de desempeño y área de aplicación.

Uno de los aspectos diferenciadores del modelo consiste en relacionar cada indicador con las problemáticas logísticas que pretende monitorear y con los escenarios evaluados durante la investigación. Esto permite que los resultados obtenidos a través de los KPIs sirvan como apoyo para el seguimiento del desempeño y la toma de decisiones, más allá de una función exclusivamente descriptiva. Este enfoque es consistente con los planteamientos de Safaei et al. (2024) sobre la gestión integral de cadenas de suministro y con la perspectiva de Kaplan y Norton (1992) respecto al uso de indicadores como herramientas para la gestión y el mejoramiento organizacional.

- Sobre el modelo de control de inventarios.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

El modelo de revisión continua propuesto, complementado con un stock de seguridad calculado bajo un enfoque estocástico y con la aplicación de la política FEFO, busca responder a dos de las principales problemáticas identificadas en la gestión farmacéutica: los quiebres de inventario y el vencimiento de medicamentos. Una de sus principales características es que considera simultáneamente la variabilidad de la demanda y las fluctuaciones en los tiempos de reposición, permitiendo estimar niveles de seguridad más acordes con las condiciones reales de operación. Esta aproximación representa una alternativa más flexible frente a esquemas basados en niveles fijos de inventario que aún son utilizados en diferentes organizaciones del sector.

Los resultados obtenidos a partir del modelo muestran tendencias consistentes con las reportadas en estudios previos sobre gestión de inventarios farmacéuticos. En particular, las mejoras estimadas en la reducción de vencimientos y en el nivel de servicio se encuentran dentro de rangos comparables a los descritos por Villarreal y Becerra (2017) y Periolo y Quiroga (2015). Aunque los escenarios evaluados corresponden a simulaciones y no a datos operativos reales, la concordancia observada con la evidencia disponible aporta elementos que respaldan la viabilidad del enfoque propuesto y su potencial aplicación en organizaciones del sector salud colombiano.

- Sobre la evaluación teórica de hipótesis.

La evaluación de los cinco escenarios críticos permitió analizar el comportamiento del modelo frente a diferentes condiciones operativas y comparar sus resultados con los de un sistema sin mecanismos formales de gestión. De manera general, los escenarios evaluados mostraron mejoras en los indicadores de desempeño considerados, especialmente en aquellos relacionados con el nivel de servicio, la disponibilidad de medicamentos y la capacidad de respuesta ante eventos de riesgo.

Entre los escenarios analizados, el correspondiente al incremento de la demanda combinado con una interrupción parcial del suministro presentó los mayores desafíos para la operación. En este contexto, el seguimiento periódico de indicadores de alerta temprana permitió identificar señales de deterioro en el desempeño antes de que se materializaran quiebres de inventario, generando información útil para la toma de decisiones y la activación de acciones correctivas, como la búsqueda de proveedores alternativos o el ajuste de las políticas de abastecimiento.

Este hallazgo resulta particularmente relevante para el contexto colombiano, donde diversos estudios e informes institucionales han señalado la dependencia de un número reducido de proveedores para ciertos medicamentos y tecnologías en salud. En este sentido, la incorporación de mecanismos de monitoreo basados en indicadores puede contribuir a mejorar la capacidad de anticipación y respuesta de las organizaciones frente a eventos que afecten la continuidad del suministro.

- Sobre la simulación computacional y la interoperabilidad

La simulación desarrollada en Python–Streamlit permitió recrear el comportamiento de los principales actores involucrados en la cadena de suministro farmacéutica mediante una arquitectura orientada a eventos (EDA). A través del prototipo fue posible representar procesos como la generación de órdenes médicas, las autorizaciones, la reserva de inventario, la dispensación y la trazabilidad de medicamentos, facilitando el análisis de la interacción entre estos procesos bajo diferentes escenarios operativos.

La incorporación de identificadores regulatorios utilizados en el sistema de salud colombiano, como los códigos CUM, IUM y los registros sanitarios, permitió mantener una

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación estructura alineada con las prácticas y requisitos del sector. Asimismo, la simulación puso de manifiesto el papel que tiene la interoperabilidad entre los diferentes actores para mejorar la visibilidad de la información y apoyar la gestión de inventarios ante posibles situaciones de desabastecimiento.

Los escenarios evaluados se construyeron a partir de parámetros estimados y condiciones controladas, en concordancia con el propósito de validar el funcionamiento del modelo antes de una eventual aplicación en entornos reales. Los resultados obtenidos mostraron que la estructura propuesta es capaz de representar adecuadamente los procesos considerados en la investigación y de generar información útil para el análisis de indicadores logísticos. Aunque la simulación no sustituye una implementación operativa en una organización real, sí proporciona una base para evaluar el comportamiento del modelo y explorar su potencial aplicación en procesos de gestión farmacéutica.

- Limitaciones y trabajo futuro

El proyecto reconoce las siguientes limitaciones: (a) los resultados de la Tabla 5 fueron obtenidos mediante el modelo matemático y la simulación en escenarios controlados, no mediante datos empíricos de una organización real en producción; (b) los parámetros estocásticos (σ_d , σ_L , Z) requieren series históricas de demanda confiables para calibración óptima, información que no siempre está disponible en organizaciones del sector salud colombiano; (c) la guía técnica no ha sido implementada ni evaluada en un entorno productivo real; y (d) el prototipo de simulación no está integrado con sistemas ERP, bases de datos hospitalarias o plataformas institucionales reales.

Asimismo, la simulación computacional fue desarrollada en un entorno controlado y sin integración directa con sistemas ERP, bases de datos hospitalarias o plataformas institucionales reales, lo que limita la validación operativa del modelo en escenarios de producción.

De igual manera, los flujos de interoperabilidad representados corresponden a una aproximación conceptual basada en procesos observados en el sector salud colombiano, por lo que futuras implementaciones requerirán procesos de integración tecnológica y validación institucional.

Como trabajo futuro se recomienda: (1) implementar y validar el modelo en al menos una IPS o EPS colombiana para obtener datos empíricos de contraste; (2) desarrollar una herramienta digital (hoja de cálculo o aplicación web) que automatice el cálculo de los parámetros del modelo a partir de los datos históricos de la organización; (3) ampliar la revisión sistemática para incorporar desarrollos metodológicos post-2026 en materia de inteligencia artificial aplicada a la gestión de inventarios farmacéuticos; y (4) integrar el prototipo computacional con herramientas de analítica avanzada y bases de datos interoperables que permitan monitoreo en tiempo real del inventario y trazabilidad farmacéutica.

En conjunto, el proyecto permitió integrar componentes regulatorios, logísticos y tecnológicos dentro de un modelo funcional orientado al fortalecimiento de la trazabilidad, interoperabilidad y control de inventarios en la cadena de suministro farmacéutica colombiana.

El principal aporte de la investigación radica en la articulación entre revisión sistemática, diseño de indicadores, modelado logístico y simulación computacional, proporcionando una

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación
propuesta adaptable al contexto nacional y susceptible de ser utilizada como base para futuras implementaciones operativas en organizaciones del sector salud.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ballou, R. H. (2004). *Logística: administración de la cadena de suministro* (5.^a ed.). Pearson Educación.
- Cachon, G., & Terwiesch, C. (2019). *Matching supply with demand: An introduction to operations management* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2013). *Administración de la cadena de suministro: Estrategia, planeación y operación* (5.^a ed.). Pearson.
- Council of Supply Chain Management Professionals [CSCMP]. (2013). *Supply chain management definitions and glossary*. CSCMP.
- De Vries, J. (2011). *The shaping of inventory systems in health services: A stakeholder analysis*. International Journal of Production Economics, 133(1), 60–69.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.06.031>
- Guerrero-Salas, H. (2009). *Inventarios: manejo y control*. Ecoe Ediciones.
- Gupta, D., & Denton, B. (2008). Appointment scheduling in health care: Challenges and opportunities. *IIE Transactions*, 40(9), 800–819.
<https://doi.org/10.1080/07408170802165880>
- Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos [INVIMA]. (2020). *Manual de buenas prácticas de almacenamiento y distribución de medicamentos*. INVIMA.
- Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos [INVIMA]. (s. f.). *Lineamientos para la implementación de vigilancia en medicamentos en la racional de laboratorios*.
<https://www.invima.gov.co/biblioteca/lineamientos-vigilancia-medicamentos-laboratorios-invima>
- Kaplan, R. S., & Norton, D. P. (1992). *The balanced scorecard: Measures that drive performance*. Harvard Business Review, 70(1), 71–79.

**Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño
logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante
simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos
de implementación**

61

- Kelle, P., Woosley, J., & Schneider, H. (2012). *Pharmaceutical supply chain specifics and inventory solutions for a hospital case*. *Operations Research for Health Care*, 1(2–3), 54–63.
<https://doi.org/10.1016/j.orhc.2012.07.001>
- Lee, H. L., Padmanabhan, V., & Whang, S. (1997). *The bullwhip effect in supply chains*. *MIT Sloan Management Review*, 38(3), 93–102.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2016). *Resolución 1124 de 2016*.
<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-1124-de-2016.pdf>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2018). *Política farmacéutica nacional*. Ministerio de Salud de Colombia.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2021). *Indicadores de calidad en la prestación de servicios de salud*. Ministerio de Salud de Colombia.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). *Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement*. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097.
<https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Nahmias, S. (2009). *Production and operations analysis* (6th ed.). McGraw-Hill.
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2010). *WHO good distribution practices for pharmaceutical products*.
https://www.cls.co.at/media/files/who_gdp_tr957_annex5_cls_co_at.pdf
- Organización Mundial de la Salud [OMS]. (2016). *Interagency guidelines on the management of essential medicines*. WHO.
- Organización Panamericana de la Salud [OPS]. (2019). *Gestión de suministros de medicamentos*. OPS.
- Periolo, N., & Quiroga, F. (2015). *Gestión de inventarios en el sector salud: modelo multiproducto para hospitales públicos de Argentina*. *Revista de Administración en Salud*, 12(2), 44–58.
- Pinzón, R., & Castañeda, L. (2018). *Evaluación del desempeño logístico en hospitales colombianos: Una revisión de literatura*. *Revista Ingeniería e Investigación*, 38(3), 55–64.
- Radasanu, A. C. (2016). *Inventory management, service level, and safety stock*. *Journal of Public Administration, Finance and Law*, 9, 145–153.

Modelo integral para la evaluación y optimización del desempeño logístico en la cadena de suministro de medicamentos mediante simulación, indicadores de control de inventarios y lineamientos técnicos de implementación

Ramírez, A., & López, M. (2020). *Análisis de quiebres de stock en cadenas de suministro de medicamentos en Colombia*. *Revista de Salud Pública*, 22(1), 1–9. <https://doi.org/10.15446/rsap.v22n1>

Romero Avendaño, J. L., & Valenzuela García, J. E. (2023). *Propuesta de mejora en la cadena de suministro de la empresa Agroinnovar Ltda. mediante la evaluación de la gestión logística* [Trabajo de especialización]. Universidad ECCI.

Safaei, M., Fathi, M., García-Herreros, A., & Jahani, H. (2024). *A comprehensive evaluation model for sustainable supply chain capabilities in the energy sector*. *Sustainability*, 16(21), 9171. <https://doi.org/10.3390/su16219171>

Silver, E. A., Pyke, D. F., & Thomas, D. J. (2017). *Inventory and production management in supply chains* (4th ed.). CRC Press.

Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2008). *Designing and managing the supply chain: Concepts, strategies, and case studies* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Sistema de Información de Precios de Medicamentos [SISMED]. (2022). *Informe de precios y abastecimiento de medicamentos en Colombia*. Ministerio de Salud de Colombia.

Slack, N., Brandon-Jones, A., & Johnston, R. (2013). *Operations management* (7th ed.). Pearson.

Superintendencia Nacional de Salud. (2020). *Informe de seguimiento al desabastecimiento de medicamentos en Colombia*. Supersalud.

Tersine, R. J. (1994). *Principles of inventory and materials management* (4th ed.). Prentice Hall.

Vélez, A. (2019). *Modelos de reaprovisionamiento en instituciones prestadoras de servicios de salud: revisión y propuesta metodológica*. *Revista EAN*, 86, 113–130.

Vidal, C. J. (2010). *Fundamentos de gestión de inventarios*. Universidad del Valle.

Villarreal, F., & Becerra, M. (2017). *Gestión de inventarios con restricciones de perecibilidad: aplicación en el sector farmacéutico colombiano*. *Ingeniería Industrial*, 38(2), 178–192.

Vogler, S., Zimmermann, N., & Habl, C. (2013). *Price regulation and procurement of pharmaceuticals*. World Health Organization.

Waters, D. (2009). *Supply chain management: An introduction to logistics* (2nd ed.). Palgrave Macmillan.

RELACIÓN DE ANEXOS TÉCNICOS

El presente proyecto cuenta con anexos técnicos desarrollados como soporte metodológico y documental del proceso de análisis, simulación y estructuración de propuestas de mejora operativa.

Estos anexos permiten ampliar la comprensión técnica del trabajo realizado y evidencian los modelos, herramientas y lineamientos desarrollados durante la práctica profesional.

Anexo	Descripción	Relación con el proyecto
Anexo A	Simulación Proceso Integrado – Cadena de Suministro	Permite visualizar escenarios operativos y analizar el comportamiento del proceso bajo diferentes condiciones de gestión y flujo operativo.
Anexo B	Guía Técnica Gestión de la Cadena de Suministro de Medicamentos	Consolida lineamientos operativos, reglas funcionales, trazabilidad y estructura documental para la gestión del proceso.
Anexo C	Modelo Inventarios H1–H5	Presenta la validación y análisis de escenarios críticos del modelo de inventarios mediante hipótesis operativas y simulaciones de desempeño.