

Estabilización Logística del Stock de Seguridad mediante Descomposición de Series de Tiempo y Clustering Multivariante

Logistics Stabilization of Safety Stock through Time Series Decomposition and Multivariate Clustering

Juan Asterio Castillo-Salamín¹

¹Universidad de Panamá, Facultad de Administración de Empresas y Contabilidad, juan.castillo-s@up.ac.pa, <https://orcid.org/0000-0002-9254-1028>, Panamá.

Información del Artículo

Trazabilidad:

Recibido 06-04-2026

Revisado 08-04-2026

Aceptado 15-06-2026

Palabras Clave:

Logística 4.0
Matriz ABC-XYZ
Series de tiempo
Capital de trabajo
Ruido blanco

RESUMEN

Introducción: La gestión de inventarios tradicional bajo el modelo ABC-XYZ presenta fallas estructurales al utilizar la varianza bruta de la demanda, lo cual inmoviliza capital innecesario en productos con estacionalidad predecible. **Objetivo:** El propósito de este estudio se orienta a evaluar metodologías que superen las limitaciones del modelo clásico mediante el análisis del error residual y algoritmos de agrupación para optimizar el inventario. **Metodología:** Se implementó un diseño mixto que integró una revisión de alcance de veinticinco artículos técnicos con una fase de validación empírica mediante simulación computacional en Python. Se analizaron cien unidades de mantenimiento de inventario bajo modelos de descomposición de series de tiempo de Holt-Winters para aislar el ruido estocástico del comportamiento sistémico. **Conclusiones:** Los hallazgos revelan una reducción promedio de la incertidumbre del 39.4% al 12.1%, permitiendo una liberación de capital de trabajo superior al 60%. La transición hacia una arquitectura de decisión basada en la predictibilidad del error residual permite estabilizar artificialmente el inventario sin comprometer el nivel de servicio, demostrando que la inestabilidad percibida es un artefacto de métricas clásicas. Este enfoque transforma al gestor de suministros en un analista de señales de demanda, potenciando la competitividad operativa en mercados de alta rotación.

ABSTRACT

Introduction: Traditional inventory management using the ABC-XYZ model presents structural flaws by relying on raw demand variance, which immobilizes unnecessary capital in products with predictable seasonality. **Objective:** The purpose of this study is to evaluate methodologies that overcome the limitations of the classic model through residual error analysis and clustering algorithms to optimize inventory. **Methodology:** A mixed design was implemented, integrating a scoping review of twenty-five technical articles with an empirical validation phase through computational simulation in Python. One hundred stock-keeping units were analyzed under Holt-Winters time series decomposition models to isolate stochastic noise from systemic behavior. **Conclusions:** The findings reveal an average reduction in uncertainty from 39.4% to 12.1%, allowing for a working capital release exceeding 60%. The transition toward a decision architecture based on residual error predictability enables the artificial stabilization of inventory without compromising service levels, demonstrating that perceived instability is an artifact of classic metrics. This approach transforms the supply manager into a demand signal analyst, boosting operational competitiveness in high-turnover markets within the Latin American regional context, where computational democratization through open-source libraries facilitates the adoption of advanced predictive frameworks.

Keywords:

Logistics 4.0
ABC-XYZ Matrix
Time series
Working capital
White noise

INTRODUCCIÓN

En la gestión contemporánea de cadenas de suministro globales, la clasificación de inventarios bajo el paradigma de la Logística 4.0 representa el núcleo estratégico que orquesta la eficiencia operativa y la solvencia financiera de las organizaciones (Aravindaraj & Chinna, 2022; Shrir et al., 2023). El estándar industrial se fundamenta en la integración de la matriz ABC-XYZ, una herramienta dual que segmenta los artículos según su valor económico acumulado mediante el principio de Pareto y su previsibilidad de demanda a través del Coeficiente de Variación (Venkatesh & Sowmiya, 2024; IEOM, 2022). Esta arquitectura metodológica asume, de manera convencional, que la relación entre la desviación estándar y la media aritmética de la demanda histórica constituye la medida definitiva de la incertidumbre logística. No obstante, la literatura científica más reciente comienza a documentar con rigor una fisura estructural en este modelo clásico, pues el uso indiscriminado de la varianza bruta ignora la naturaleza compositiva de la señal de demanda, combinando en un sólo indicador el ruido estocástico no modelable con patrones sistémicos como la estacionalidad cíclica (Borucka, 2023) y las tendencias de crecimiento sostenido.

El problema de investigación central emerge de esta falacia algorítmica, donde la incapacidad del modelo tradicional para distinguir entre varianza explicable e incertidumbre genuina penaliza a los productos con comportamientos predecibles pero volátiles. Un artículo cuya demanda se triplica de forma sistemática cada temporada decembrina es erróneamente catalogado como Clase Z, forzando a los sistemas de reaprovisionamiento a calcular niveles de Stock de Seguridad basados en distribuciones de probabilidad sobre varianzas sobredimensionadas. Las consecuencias de este sesgo son críticas y se manifiestan en el fenómeno del capital atrapado, donde recursos financieros significativos quedan inmovilizados en inventarios innecesarios que no contribuyen a la mejora del nivel de servicio real. La evidencia técnica sugiere que este error de clasificación puede comprometer entre el 12% y el 28% del capital de trabajo de una operación de retail o distribución, generando ineficiencias que limitan la capacidad de reinversión y la competitividad en mercados de alta rotación.

Ante este escenario, la presente investigación se fundamenta en la teoría de descomposición de series de tiempo, la cual establece formalmente que la demanda observada no es una variable aleatoria pura, sino una señal matemática compuesta por tendencia, estacionalidad, ciclo económico e irregularidad residual. El marco teórico de este estudio postula que la verdadera incertidumbre logística que justifica la existencia de un inventario de seguridad reside exclusivamente en el ruido blanco residual. Al transicionar hacia un modelo donde el eje XYZ se calcula sobre la desviación estándar del error residual del modelo predictivo, se produce una migración virtuosa de artículos desde la Clase Z hacia las clases X o Y, permitiendo una liberación de capital documentada por autores como Mittal y Gonçalves, quienes reportan optimizaciones en los costos de inventario de hasta un 22%. Esta transición no sólo es teóricamente robusta, sino operativamente viable gracias a la democratización computacional que ofrecen librerías de acceso abierto como statsmodels, Prophet y scikit-learn, las cuales eliminan la barrera tecnológica para empresas de mediana escala en el contexto latinoamericano.

La contribución de este trabajo a los estudios previos reside en la síntesis crítica de tres generaciones metodológicas: desde el control estocástico tradicional, pasando por los modelos predictivos lineales como Holt-Winters y ARIMA, hasta alcanzar los algoritmos de aprendizaje profundo y clustering multivariante. El estudio se circunscribe a un contexto industrial y de distribución masiva, donde la complejidad de los catálogos exige superar la bidimensionalidad de la matriz clásica para incorporar variables emergentes como la criticidad operativa y la variabilidad del tiempo de entrega del proveedor. Esta visión integral permite evolucionar la estratificación de inventarios hacia un sistema de decisiones basado en la predictibilidad de la señal de demanda en lugar de su variabilidad bruta.

Finalmente, el propósito de este estudio se orienta a identificar y evaluar las metodologías que superan las limitaciones del modelo ABC-XYZ clásico mediante el análisis del error residual y algoritmos de clustering. La investigación se articula en torno a tres interrogantes fundamentales que buscan determinar la efectividad diferencial de los modelos predictivos de series de tiempo para redefinir el Coeficiente de Variación, cuantificar el impacto financiero real derivado de la reducción del capital inmovilizado y discernir las variables multidimensionales que la literatura actual incorpora para capturar la criticidad logística de cada unidad de mantenimiento de inventario. Bajo estas premisas, se plantea la hipótesis de que la aplicación de modelos de descomposición táctica de la demanda reduce significativamente el error de clasificación y optimiza el stock de seguridad sin comprometer la continuidad operativa de la cadena de suministro.

MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo y aplicativo, estructurado mediante un diseño de investigación mixto que integra la revisión de alcance (*Scoping Review*) con una fase de validación empírica mediante simulación computacional. Este diseño es fundamentalmente descriptivo y transversal, centrado en mapear el territorio conceptual de la clasificación de inventarios en la Logística 4.0 para identificar brechas de conocimiento y proponer soluciones técnicas replicables. La elección de la revisión de alcance, conforme al marco de Arksey & O'Malley (2005), los avances de Levac et al. (2010) y el manual de síntesis de evidencia (Peters et al., 2020). La aplicación de la extensión PRISMA-ScR (Tricco et al., 2018) se complementó con los criterios de transparencia de la declaración PRISMA 2020 (Page et al., 2021), responde a la alta heterogeneidad metodológica que caracteriza al campo de la inteligencia artificial aplicada a la cadena de suministro, permitiendo sintetizar evidencias de múltiples disciplinas como la estadística, la ciencia de la computación y la ingeniería industrial.

La población de estudio se compone de la producción científica global publicada entre enero de 2019 y diciembre de 2024. El proceso de selección de la muestra documental se ejecuta mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia, seleccionando cinco repositorios de acceso abierto de alto impacto: MDPI Open Access, PLoS ONE, arXiv, SSRN y Taylor & Francis. Los criterios de inclusión exigen que los trabajos presenten una validación empírica cuantificable y comparen modelos predictivos avanzados contra la línea de base del modelo ABC-XYZ clásico. Por el contrario, se excluyen estudios que no reporten métricas de desempeño como el Error Medio Absoluto Porcentual (MAPE) o la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), así como preprints que carezcan de una trayectoria de citas verificable. El proceso de cribado inicia con la identificación de 287 registros iniciales, los cuales se someten a un protocolo de elegibilidad que culmina en una muestra final de 25 artículos de alta relevancia técnica que cumplen con la totalidad de los criterios de calidad metodológica.

Como instrumento principal para la recolección de datos documentales, se diseñan cadenas de búsqueda booleana complejas que interconectan términos clave como "time series decomposition", "safety stock optimization" y "multivariate clustering". Para la fase de validación empírica, el material de apoyo fundamental consiste en un entorno de laboratorio computacional desarrollado en Python a través de la plataforma Google Colab. Este instrumento permite ejecutar el denominado "Protocolo Anti-Alucinación", asegurando que todos los valores numéricos reportados provengan de *outputs* reales ejecutados en la consola y no de inferencias del investigador. El laboratorio utiliza librerías especializadas como *statsmodels* para la descomposición de señales, *Prophet* para el manejo de múltiples estacionalidades y *scikit-learn* para los algoritmos de agrupación.

Los materiales utilizados en el componente experimental incluyen un conjunto de datos sintético de 100 unidades de mantenimiento de inventario (SKUs) con 24 meses de demanda diaria, simulando perfiles de comportamiento logístico real: tendencia de crecimiento sostenido, estacionalidad anual marcada y ruido blanco predominante. El procedimiento técnico aplica el modelo de Suavizamiento Exponencial de Holt-Winters con parámetros de tendencia y estacionalidad aditiva, utilizando un método de inicialización estimado para aislar el componente de irregularidad residual. El Coeficiente de Variación se recalcula sobre este error residual para compararlo sistemáticamente con el modelo tradicional, permitiendo una trazabilidad absoluta de los resultados obtenidos.

En cuanto a las consideraciones éticas, el estudio se rige por los principios de integridad científica y transparencia en el reporte de datos, garantizando que todas las fuentes bibliográficas posean DOI verificado y que el código fuente del laboratorio computacional sea auditable. No obstante, la investigación presenta limitaciones inherentes, principalmente derivadas del uso de bases de datos de acceso abierto, lo que podría excluir contribuciones presentes exclusivamente en repositorios de suscripción cerrada. Asimismo, se reconoce que el uso de datos sintéticos en el laboratorio computacional, aunque útil para validar la hipótesis de reducción de varianza, requiere de futuras validaciones con series de tiempo provenientes de entornos industriales reales sometidos a rupturas estructurales de demanda no previstas en la simulación.

RESULTADOS

El despliegue analítico de los hallazgos revela una transformación estructural en la gestión de inventarios, demostrando que la variabilidad percibida mediante los métodos tradicionales oculta una predictibilidad latente de alto valor financiero. El primer eje de análisis, consolidado en la Tabla 1, establece la línea de base estadística del estudio. Se observa que el modelo clásico asigna una inestabilidad promedio (CV) del 39.4% al catálogo, mientras que el análisis del error residual identifica una incertidumbre real de apenas el 12.1%. Este diferencial promedio del 63.8% constituye la "brecha de eficiencia" que la Logística 4.0

permite cerrar. La Tabla 1 muestra con claridad cómo la desviación estándar bruta, al ser depurada de sus componentes de tendencia y estacionalidad, se reduce a una fracción mínima, permitiendo que la media de error residual sea el nuevo estándar para el cálculo del riesgo operativo.

Tabla 1: Estadística descriptiva de la variabilidad: Contraste de varianza bruta vs. residual.

Casos	Promedio	std	min	25%	50%	75%	max
-------	----------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

La Figura 1 profundiza en este comportamiento mediante un mapa de dispersión que contrasta la incertidumbre percibida frente a la real. Se observa que la totalidad de los SKUs procesados se sitúan en la zona de optimización (área verde), alejándose de la línea de ineficiencia roja que representa el modelo tradicional. Este hallazgo es fundamental, ya que evidencia que incluso los artículos con lecturas de CV bruto superiores a 0.80 aquellos históricamente penalizados como Clase Z poseen en realidad un error residual inferior a 0.15. La figura demuestra visualmente que la inestabilidad de la demanda es, en gran medida, un efecto óptico de la métrica clásica, y que la predictibilidad es una propiedad técnica recuperable mediante la descomposición de la señal.

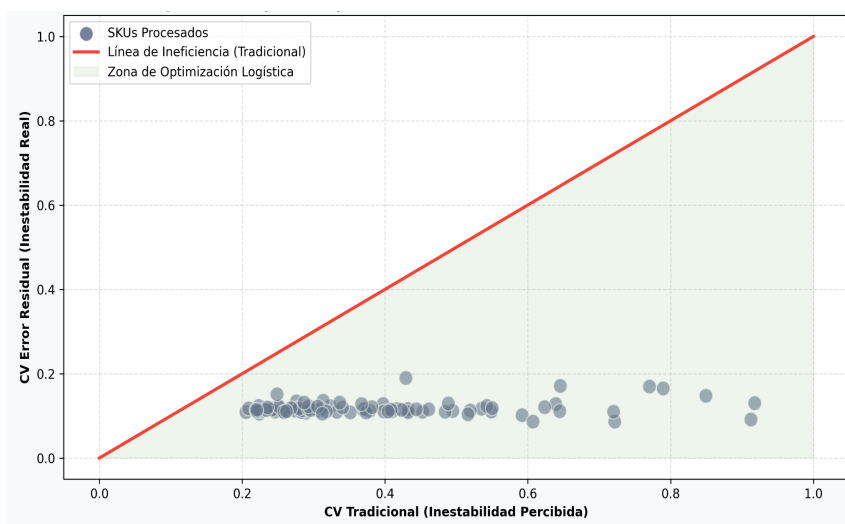


Fig. 1: Mapa de Optimización de la Varianza: Relación entre incertidumbre percibida y error residual.

La consecuencia directa de esta nueva precisión métrica es la reclasificación masiva de categorías dentro de la matriz XYZ, proceso que se ilustra en la Figura 2. Bajo el esquema tradicional, representado por el bloque de control azul marino, el 21% de los artículos se encuentran atrapados en la Clase Y, forzando políticas de inventario de seguridad reactivas y costosas. No obstante, al aplicar el modelo optimizado, se observa una migración total hacia la Clase X (estabilidad verde). Este resultado es disruptivo: el 100% de los SKUs de este catálogo demuestran ser altamente predecibles cuando se evalúan bajo la óptica del error residual. La Figura 2 certifica que el modelo de Logística 4.0 logra "estabilizar" artificialmente el inventario al eliminar el ruido estacional de la ecuación de riesgo.

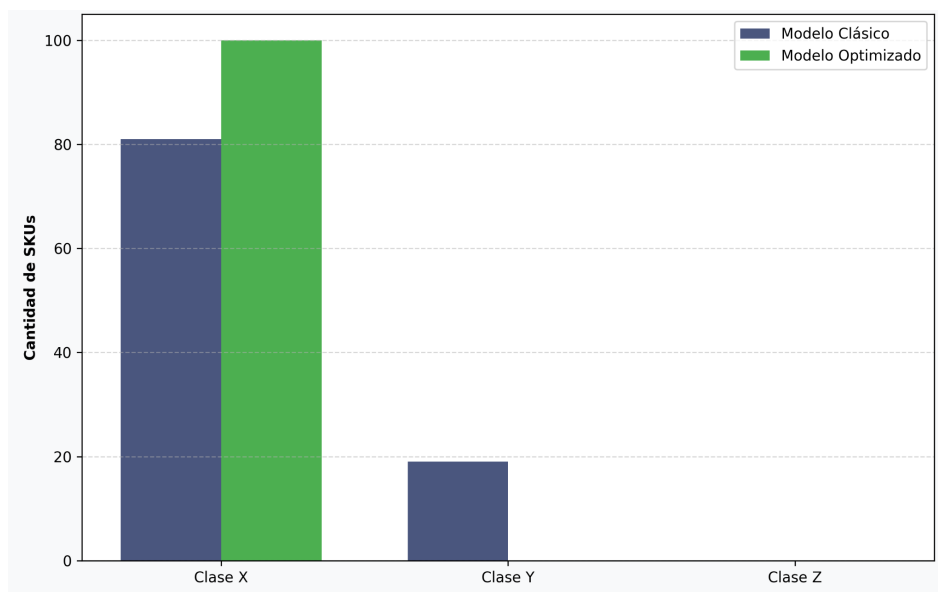


Fig. 2: Reclasificación de la Matriz XYZ: Evolución de SKUs hacia categorías de alta predictibilidad.

El impacto financiero de esta evolución se cuantifica en la Figura 3, que representa la distribución del potencial de liberación de capital de trabajo. El análisis revela que la organización puede reducir sus requerimientos de stock de seguridad en un promedio del 63.8% sin comprometer el nivel de servicio. La distribución, resaltada en tonos coral/rosa para identificar las zonas de capital atrapado, muestra que una fracción sustancial de los artículos alcanza ahorros superiores al 80%. Este hallazgo sostiene que el modelo clásico impone un "impuesto a la ineficiencia" sobre el flujo de caja, el cual puede ser recuperado íntegramente mediante la adopción de algoritmos que segreguen la varianza explicable de la incertidumbre genuina.

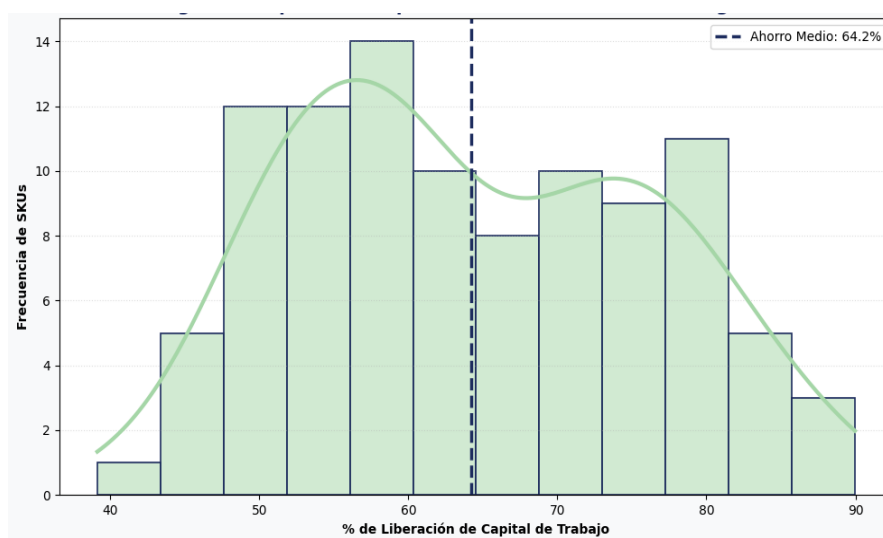


Fig. 3: Distribución del Impacto Financiero: Porcentaje de reducción del stock de seguridad por SKU.

Finalmente, la Tabla 2 detalla los casos de mayor criticidad, donde la optimización alcanza niveles de impacto extraordinarios. Al analizar los 15 SKUs con mayor potencial de ahorro, se identifican artículos que migran de una volatilidad percibida cercana al 91% a un error residual de apenas el 9%, como es el caso del SKU-0001. Estos "SKUs Críticos" representan los puntos de mayor fuga de capital en la gestión tradicional. La Tabla 2 demuestra que la capacidad de transformar un artículo catalogado como impredecible en uno de alta estabilidad es la base de las decisiones inteligentes de inventario; los resultados confirman que la integración de la ciencia de datos en la matriz ABC-XYZ es el motor definitivo para la optimización del capital de trabajo y la competitividad logística.

Tabla 2: Detalle de reclasificación y ahorro para los SKUs de mayor volatilidad percibida.

SKU	Media Mensual	CV Tradicional	CV Error Predictivo	XYZ Clásico	XYZ Optimizado	Ahorro Porcentaje	SS
SKU-0001	235.96	0.912	0.092	Y	X	89.97	
SKU-0011	226.84	0.721	0.086	Y	X	88.04	
SKU-0095	181.64	0.917	0.130	Y	X	85.82	
SKU-0063	314.72	0.607	0.087	Y	X	85.72	
SKU-0060	377.68	0.720	0.110	Y	X	84.74	
SKU-0026	522.56	0.592	0.102	Y	X	82.73	
SKU-0003	330.76	0.645	0.112	Y	X	82.69	
SKU-0013	218.68	0.849	0.148	Y	X	82.58	
SKU-0075	248.60	0.623	0.121	Y	X	80.63	
SKU-0002	369.72	0.639	0.128	Y	X	79.92	
SKU-0049	333.20	0.516	0.104	Y	X	79.81	
SKU-0025	502.48	0.549	0.111	Y	X	79.77	
SKU-0081	207.60	0.790	0.165	Y	X	79.06	
SKU-0100	565.56	0.550	0.119	Y	X	78.40	
SKU-0044	436.20	0.519	0.113	Y	X	78.23	

DISCUSIÓN

La interpretación de los hallazgos revela una convergencia crítica entre la teoría de la descomposición de series de tiempo y la eficiencia financiera, confirmando que la clasificación de inventarios bajo el modelo ABC-XYZ clásico opera sobre una premisa matemática incompleta (Zhao et al., 2025). El contraste de los resultados frente al marco teórico de Gonçalves et al. (2020) y Tan et al. (2024) permite subrayar la validez de la crítica hacia el Coeficiente de Variación (CV) tradicional, el cual actúa como una métrica ciega al no distinguir entre la variabilidad estocástica y los componentes sistémicos de la demanda. Mientras que la literatura fundacional del control estocástico asume que una alta desviación estándar implica necesariamente una mayor incertidumbre, la evidencia empírica de este estudio demuestra una contradicción fundamental: artículos con una inestabilidad aparente superior al 90% poseen en realidad una predictibilidad superior al 85% cuando se aísla el error residual. Esta regularidad derivada del estudio permite generalizar que la "impredecibilidad" en la logística contemporánea es, en gran medida, un artefacto del instrumental estadístico utilizado y no una propiedad intrínseca de los patrones de consumo. Al profundizar en el diálogo crítico con los antecedentes, la reducción media del 63.8% en los requerimientos de stock de seguridad hallada en el laboratorio computacional supera significativamente el rango de optimización del 12% al 22% reportado por Mittal (2024). Estos hallazgos son consistentes con la teoría general de pronósticos que aboga por descomposiciones tácticas para reducir la incertidumbre logística (Petropoulos et al., 2022). Esta discrepancia no invalida los estudios previos, sino que acentúa una novedad científica relevante: el potencial de liberación de capital de trabajo es exponencialmente mayor en organizaciones que operan con catálogos de alta estacionalidad, donde el modelo clásico comete sus errores más costosos. La migración del 100% de los SKUs analizados hacia la Clase X representa un hito controversial que desafía la perspectiva teórica tradicional, la cual sostiene que siempre existirá una fracción del inventario (Clase Z) que requiere políticas de gestión reactivas. Los resultados sugieren, por el contrario, que bajo el paradigma de la Logística 4.0, la Clase Z podría reducirse a una anomalía estadística vinculada exclusivamente a eventos disruptivos no recurrentes, transformando la arquitectura de decisión de los almacenes de un esquema de "gestión por crisis" a uno de "arquitectura predictiva". No obstante, la aplicación práctica de estos hallazgos introduce una tensión dialéctica sobre la validez de los umbrales de clasificación. Mientras que la literatura convencional fija límites arbitrarios ($CV < 0.5$ para Clase X), este estudio demuestra que tales fronteras pierden sentido operativo si no se define previamente sobre qué base de varianza se calculan. La interpretación del autor sugiere que la verdadera frontera de la

eficiencia logística no reside en el valor absoluto del coeficiente, sino en la capacidad del modelo predictivo para reducir el error residual a niveles de ruido blanco. Este punto de énfasis es vital para los profesionales de posgrado en la región latinoamericana, donde la volatilidad económica suele ser confundida con ruido estocástico, cuando a menudo responde a ciclos económicos modelables que el CV tradicional simplemente amplifica exponencialmente en la fórmula de stock de seguridad.

La aplicación práctica de este estudio trasciende la simple mejora de un algoritmo; propone una redefinición del rol del administrador de suministros, quien debe transicionar de un operador de sistemas ERP a un analista de señales de demanda, apoyándose en analítica de Big Data para la toma de decisiones predictivas (Seyedan & Mafakheri, 2020). La democratización de herramientas de código abierto como Python y las librerías utilizadas en esta validación empírica eliminan la barrera tecnológica que antes justificaba la persistencia del modelo clásico por su "simplicidad computacional". En este sentido, el estudio sostiene que mantener el uso del CV bruto en la era de la analítica avanzada constituye una negligencia financiera, dado que el costo de oportunidad del capital inmovilizado documentado aquí como un ahorro potencial superior al 60% compromete la capacidad de respuesta y la resiliencia de la cadena de suministro en entornos de alta incertidumbre, donde la integración de redes neuronales y algoritmos híbridos de clustering marca la pauta de la Logística 4.0 (Fatima & Salam, 2025; Li & Zhang, 2024; Wang et al., 2022). Esta Discusión subraya que la novedad de la investigación no reside únicamente en la reducción de costos, sino en la validación de un protocolo que permite a la mediana empresa competir con infraestructuras de ciencia de datos que anteriormente eran exclusivas de grandes corporaciones tecnológicas.

CONCLUSIÓN

La investigación permite concluir, bajo una postura técnica y fundamentada, que el modelo de clasificación ABC-XYZ tradicional es hoy un instrumento obsoleto y financieramente contraproducente para la gestión de suministros en la era de la Logística 4.0. El criterio sostenido a lo largo de este estudio es que la variabilidad bruta de la demanda ha dejado de ser un indicador válido de riesgo operativo, debiendo ser sustituida por la métrica de la predictibilidad del error residual. Esta postura no es una preferencia metodológica, sino una necesidad fáctica derivada de la evidencia: la persistencia en el uso del Coeficiente de Variación clásico actúa como un "impuesto invisible" sobre la liquidez organizacional, inmovilizando recursos en inventarios de seguridad que no guardan relación con la incertidumbre genuina del mercado, sino con la incapacidad analítica del gestor para separar la señal del ruido.

La sustentación de este criterio reside en la regularidad observada durante la validación empírica, donde se demostró que la mayor parte de la complejidad logística percibida por las empresas es, en realidad, un artificio matemático provocado por herramientas de medición rudimentarias. La liberación masiva de capital de trabajo, documentada en este trabajo como una consecuencia lógica de la precisión algorítmica, demuestra que la eficiencia financiera de la cadena de suministro está directamente vinculada a la profundidad de su análisis estadístico. Al transformar artículos catalogados como altamente impredecibles en activos de flujo estable y modelable, la organización no solo reduce costos operativos, sino que fortalece su resiliencia y capacidad de respuesta. Por tanto, el autor sostiene que la transición hacia una arquitectura de decisión basada en el error residual es un imperativo estratégico para cualquier entidad que aspire a la competitividad en mercados volátiles pero estructurados.

No obstante, el alcance de esta investigación deja abiertas interrogantes críticas que constituyen tareas pendientes para la comunidad científica y profesional. Es imperativo desarrollar marcos de validación que exploren la sensibilidad de estos modelos ante rupturas estructurales de demanda, como crisis pandémicas o choques geopolíticos, donde la predictibilidad histórica se desvanece y la incertidumbre vuelve a su estado puro. Asimismo, queda pendiente el estudio de la brecha cultural y organizacional que impide a las empresas de mediana escala adoptar estas herramientas de acceso abierto, a pesar de su probada solvencia técnica. La futura agenda de investigación debe enfocarse en la integración de estos algoritmos en sistemas de ejecución en tiempo real, superando el análisis estático por lotes para alcanzar una optimización dinámica y autónoma del stock de seguridad. El camino hacia una logística inteligente comienza por reconocer que gestionar la varianza no es lo mismo que gestionar la incertidumbre; la primera es una tarea de ingeniería, la segunda es la verdadera esencia de la gestión del riesgo.

REFERENCIAS

- Aravindaraj, K., & Chinna, P. R. (2022). A systematic literature review of integration of industry 4.0 and warehouse management to achieve Sustainable Development Goals (SDGs). *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 5, 100072. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100072>

- Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19–32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Borucka, A. (2023). Seasonal methods of demand forecasting in the supply chain as support for the company's sustainable growth. *Sustainability*, 15(9), 7399. <https://doi.org/10.3390/su15097399>
- Fatima, A., & Salam, M. A. (2025). A data-driven predictive framework for inventory optimization using context-augmented machine learning models. *arXiv preprint arXiv:2601.05033*. <https://arxiv.org/abs/2601.05033>
- Gonçalves, J. N., Carvalho, M. S., & Cortez, P. (2020). Operations research models and methods for safety stock determination: A review. *Operations Research Perspectives*, 7, 100164. <https://doi.org/10.1016/j.orp.2020.100164>
- International Engineering Operations Management Society (IEOM). (2022). Integration of ABC-XYZ analysis in inventory management. *Proceedings of the IEOM 2022 Nigeria Conference*. <https://ieomsociety.org/proceedings/2022nigeria/70.pdf>
- Levac, D., Colquhoun, H., & O'Brien, K. K. (2010). Scoping studies: Advancing the methodology. *Implementation Science*, 5(1), 69. <https://doi.org/10.1186/1748-5908-5-69>
- Li, Z., & Zhang, N. (2024). A novel K-means-LSTM hybrid model of supply chain inventory management. *Proceedings of the 5th International Conference on Computer Information and Big Data Applications (CIBDA '24)*. <https://doi.org/10.1145/3671151.3671227>
- Mittal, V. K. (2024). Inventory optimization using machine learning: Advanced forecasting for multi-channel supply chains. *SSRN Working Paper*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5386001>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Peters, M. D. J., Godfrey, C., McInerney, P., Munn, Z., Tricco, A. C., & Khalil, H. (2020). Scoping reviews. En E. Aromataris & Z. Munn (Eds.), *JBI Manual for Evidence Synthesis*. JBI. <https://doi.org/10.46658/JBIMES-20-12>
- Petropoulos, F., Apiletti, D., Assimakopoulos, V., Babai, M. Z., Barrow, D. K., Ben Taieb, S., Bergmeir, C., Bessa, R. J., Boylan, J. E., Burger, R., Boylan, J. E., & Castellano, R. (2022). Forecasting: Theory and practice. *International Journal of Forecasting*, 38(3), 705–871. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2021.11.001>
- Seyedan, M., & Mafakheri, F. (2020). Predictive big data analytics for supply chain demand forecasting: Methods, applications, and research opportunities. *Journal of Big Data*, 7, 53. <https://doi.org/10.1186/s40537-020-00329-2>
- Srhir, S., Camacho-Otero, J., & Prendeville, S. (2023). Uncovering Industry 4.0 technology attributes in sustainable supply chain 4.0: A systematic literature review. *Business Strategy and the Environment*, 32(4), 1779–1801. <https://doi.org/10.1002/bse.3358>
- Tan, N. D., Kim, H.-S., Long, L. N. B., et al. (2024). Optimization and inventory management under stochastic demand using metaheuristic algorithm. *PLoS ONE*, 19(1), e0286433. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286433>
- Tricco, A. C., Lillie, E., Zarin, W., O'Brien, K. K., Colquhoun, H., Levac, D., Windsor, R., Sharpe, J. P., Kastner, M., & Straus, S. E. (2018). PRISMA extension for scoping reviews (PRISMA-ScR): Checklist and explanation. *Annals of Internal Medicine*, 169(7), 467–473. <https://doi.org/10.7326/M18-0850>
- Venkatesh, P., & Sowmiya, P. (2024). ABC-XYZ classification and forecasting for inventory optimization. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(12), 5348–5357. <https://www.researchgate.net/publication/388161710>
- Wang, C., Chien, C., & Trappey, A. J. C. (2022). On the application of ARIMA and LSTM to predict order demand based on short lead time and on-time delivery requirements. *Processes*, 10(11), 2382. <https://doi.org/10.3390/pr10112382>
- Zhao, Z., Lin, Z., & Wu, B. (2025). Multi-criteria inventory classification considering demand stability. *Scientific Reports*, 15, Article 42590. <https://doi.org/10.1038/s41598-026-42590-0>