

Blockchain and Artificial Intelligence in Pharmaceutical Supply Chain Traceability: A Systematic Review

Damian Rojas Adrian Stefano¹; Martel Morales Oscar Fabiano²
Ibañez Estrella José Luis³; Rueda Ñopo Melisa Isabel⁴

¹Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú, U21219905@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú, U21211405@utp.edu.pe

³Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú, c31477@utp.edu.pe

⁴Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú, c18750@utp.edu.pe

Abstract- *The objective of this systematic review was to analyze how Blockchain and Artificial Intelligence (AI) technologies are applied to improve traceability in the pharmaceutical supply chain, identifying their benefits and limitations. As a method, the PRISMA and PICO methodology (P(Population), I(Intervention), C(Context), O(Outcomes)) was applied to search and select articles in the Scopus, Web of Science, and IEEE Xplore databases published between 2020 and 2025. After filtering 1731 publications, 60 studies were selected for the final analysis. The results showed that the integration of Blockchain and AI significantly improves drug authentication and logistics efficiency, with neural networks reaching accuracies of up to 95% in fraud detection. However, high implementation costs, interoperability challenges with existing systems, and the need for specialized technical personnel were identified as critical barriers. It is concluded that while the combination of blockchain and artificial intelligence has enormous potential to create a more secure and transparent supply chain, its large-scale adoption is currently limited by significant economic and operational barriers, revealing a gap between theoretical feasibility and practical implementation.*

Keywords: *artificial intelligence, traceability, pharmaceutical supply chain, logistics, manufacturing, distribution*

Blockchain e Inteligencia Artificial en la trazabilidad de la cadena de suministro farmacéutica: Una Revisión Sistemática

Damian Rojas Adrian Stefano¹; Martel Morales Oscar Fabiano²
Ibañez Estrella José Luis³; Rueda Ñopo Melisa Isabel⁴

¹Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú, U21219905@utp.edu.pe

²Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú, U21211405@utp.edu.pe

³Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú, c31477@utp.edu.pe

⁴Universidad Tecnológica del Perú, Lima-Perú, c18750@utp.edu.pe

Resumen: El objetivo de esta revisión sistemática fue analizar cómo se aplican las tecnologías Blockchain e Inteligencia Artificial (IA) para mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro farmacéutica, identificando sus beneficios y limitaciones. Como método, se aplicó la metodología PRISMA y PICO (P(Población), I(Intervención), C(Contexto), O(Resultados)) para buscar y seleccionar artículos en las bases de datos Scopus, Web of Science e IEEE Xplore publicados entre 2020 y 2025. Tras filtrar 1731 publicaciones, se seleccionaron 60 estudios para el análisis final. Los resultados mostraron que la integración de Blockchain e IA mejora significativamente la autenticación de medicamentos y la eficiencia logística, con redes neuronales que alcanzan precisiones de hasta el 95% en la detección de fraude. Sin embargo, se identificaron como barreras críticas los altos costos de implementación, los desafíos de interoperabilidad con los sistemas existentes y la necesidad de personal técnico especializado. Se concluye que, si bien la combinación de blockchain e inteligencia artificial tiene un enorme potencial para crear una cadena de suministro más segura y transparente, su adopción a gran escala se ve actualmente limitada por importantes barreras económicas y operativas, lo que revela una brecha entre la viabilidad teórica y la implementación práctica.

Palabras clave: inteligencia artificial, trazabilidad, cadena de suministro farmacéutica, logística, fabricación, distribución

I. INTRODUCCIÓN

La cadena de suministro farmacéutica se diferencia del resto por sus exigencias críticas, que incluyen el control exacto de la temperatura de fármacos, el cumplimiento normativo riguroso y la urgencia en la entrega de fármacos de calidad [1]. Asimismo, la trazabilidad consta de seguir el traslado de un producto en toda la cadena de suministro, permitiendo conocer no solo su ubicación, sino también información clave como sus características, consumo de recursos, tamaño de lotes y las etapas de transformación y distribución que ha atravesado [2]. En 2019, el 65% de las empresas experimentaron al menos una interrupción anual, con un 13% de ellas reportando pérdidas superiores a 1 millón de euros debido a estas interrupciones.[2] Por ello, en la actualidad existe una transición hacia la Industria 4.0 que ha impulsado la aplicación de la inteligencia artificial en la cadena de suministro como una herramienta esencial para una trazabilidad eficiente y transparente del producto al proporcionar capacidades avanzadas de análisis, automatización, aprendizaje y adaptación ante situaciones

imprevistas en tiempo real. [1]. Dicho esto, en estos últimos años, la IA empezó a jugar un rol clave en este ámbito. Por ejemplo, en la fase de producción, la IA a través de las redes neuronales recurrentes de tipo LSTM han sido aplicadas con éxito para analizar datos de series temporales del proceso de tableteo permitiendo predecir la generación de desperdicios durante la producción, identificando los atributos de materiales y parámetros de proceso más influyentes [3]. Por otro lado, en la fase de almacenamiento, la aplicación del modelo de IA denominado Faster R-CNN ha demostrado gran eficacia en la identificación y conteo automático de productos farmacéuticos que circula en los almacenes, reduciendo el margen de error humano y optimizando la gestión operativa [4]. Asimismo, el uso de Gemelos Digitales con capacidades cognitivas basadas en Inteligencia Artificial posibilita la detección temprana de interrupciones en alguna fase de la cadena de suministro y estima el tiempo de recuperación (TTR) y la evaluación del impacto operativo, a partir de la virtualización en tiempo real [5]. Además, para prever la demanda de medicamentos se utilizan modelos de inteligencia artificial que consideran la estacionalidad y las características específicas de los productos, lo que mejora la precisión de las previsiones y optimiza la eficiencia en la cadena de suministro farmacéutica [6]. A pesar de los grandes avances de aplicación de la inteligencia artificial en la trazabilidad de la cadena de suministro farmacéutica aún existe brechas en su adopción por la dificultad de su puesta en práctica, fiabilidad de los datos, costos de implementación y la crucial adaptación del personal para interactuar con las tecnologías de IA como el aprendizaje automático y el análisis predictivo [7]. Por eso es necesario, comprender a profundidad las diversas soluciones de IA aplicadas en cada una de las fases como la de producción y almacenamiento para una trazabilidad transparente y eficiente ante interrupciones a lo largo de toda la cadena de suministro [3][4][5][6]. De igual manera, si bien existen propuestas basadas en IA para combatir la falsificación de fármacos mediante técnicas de análisis predictivo [56] para una trazabilidad eficiente, estas soluciones aún no han sido integradas a los sistemas legacy. Por ello, se requiere un análisis del estado actual de la inteligencia artificial en la trazabilidad de la cadena de suministro farmacéutica, la identificación de sus limitaciones y la exploración de oportunidades para aumentar

su efectividad y transparencia. El desarrollo de esta revisión se justifica por la creciente necesidad de garantizar la trazabilidad eficiente y transparente de los productos farmacéuticos, frente a desafíos como disrupciones, la falsificación, el desabastecimiento y los errores logísticos dentro de los almacenes de la industria farmacéutica. Por lo tanto, analizar el uso actual de la inteligencia artificial en este sector permitirá identificar avances, limitaciones y oportunidades de mejora en la trazabilidad de productos comprendida en la cadena de suministro. De la misma forma, los resultados de esta revisión serán de ayuda y podrán ser utilizados como base teórica y técnica por investigadores, autoridades sanitarias y empresas del sector para futuras implementaciones de soluciones innovadoras que optimicen la trazabilidad de productos en la cadena de suministro farmacéutica. En el ámbito político podrá contribuir al diseño de políticas públicas relacionadas al control y fiscalización de la circulación de fármacos dentro del mercado, del mismo modo, en el ámbito social mejorará la confianza del ciudadano aduciendo a productos farmacéuticos provenientes de laboratorios autorizados y pasando por un control adecuado dentro de la cadena de suministro y finalmente en el ámbito económico apoya a la optimización de recursos logísticos al reducir pérdidas por fármacos falsificados, análisis erróneo de la demanda de medicamentos, pérdida por lotes de los fármacos y aumentando el monitoreo de la trazabilidad de los productos farmacéuticos.

II. MÉTODOLOGIA

Con el propósito de elaborar el presente artículo, se llevó a cabo un análisis sistemático de la literatura científica, utilizando como fuentes la base de datos IEEE Xplore, Web of Science y SCOPUS. A continuación, se presenta la tabla 1 que muestra la composición de la pregunta de investigación según el formato PICOC.

TABLA I
 COMPOSICIÓN DE LA PREGUNTA PICOC

	Pregunta	Palabra Claves
P	¿Cómo se define la industria farmacéutica por la aplicación de tecnologías emergentes en la cadena de suministro?	Pharmaceutical Industry, Pharma 4.0, Industry 4.0, Pharmaceutical Supply Chain, Pharmaceutical, Pharma
I	¿Qué tecnologías de IA se han aplicado para mejorar la trazabilidad de productos en la cadena de suministros farmacéutica?	Machine Learning,Neural Networks,Deep Learning,Computer Vision,Predictive Model,LSTM,Prescriptive Model,IA,NLP,Blockchain,Faster R-CNN,Image recognition
C	¿Cómo se comparan los modelos y tecnologías tradicionales utilizados en las etapas de cadena de suministro con las soluciones basadas en inteligencia artificial dentro de la cadena de suministro farmacéutica?	Spreadsheet Planning, Manual Forecasting, Time Series, Linear Regression, Heuristic Rules, ERP Systems, Manual Quotes, Email Orders, Fixed Contracts, Supplier Lists, Manual Scheduling, Visual Inspection, Rule-Based Control, Quality Checklist, Basic Automation, Barcode Scanning, Stock Cards, Inventory Logs, Spreadsheet Tracking, Warehouse Forms, Fixed Routing, Manual Dispatch, GPS

		Logging, Fleet Sheets, Paper Manifests, Manual Delivery, Order Forms, POS Records, Fixed Schedules, Delivery logs
O	¿Qué beneficios ha demostrado las soluciones de IA, y qué limitaciones presentan?	Visibility, Prediction, Automation, Security, Traceability, Innovation, Regulatory, High Cost, Data Quality, Transparency
C	¿En qué etapas de la cadena de suministro de la industria farmacéutica y regiones se ha investigado la aplicación de IA para la trazabilidad de los productos considerando la evolución industrial?	Planning,Procurement,Logistic,Manufacturing,Storage,Supply Chain,Transport,Distribution,Asia,Europe,Latin America,Africa,United States

Tras haber sintetizado los componentes del cuadro sin tener en cuenta el componente comparación surge la pregunta: ¿Cómo se están aplicando las tecnologías de inteligencia artificial para mejorar la trazabilidad en la cadena de suministro de la industria farmacéutica y cuáles son los beneficios y limitaciones identificados en sus etapas? Cabe señalar que, si bien el formato PICOC contempla un componente de comparación, en este caso no se incorpora directamente en la formulación de la pregunta con el fin de mantener un enfoque más centrado en la exploración del estado actual y las aplicaciones concretas de la inteligencia artificial en el sector farmacéutico. La omisión de la comparación permite favorecer a una revisión profunda de los aportes, desafíos y aplicación de la IA en sus diferentes fases de la cadena de suministro. Con el fin de realizar una búsqueda eficiente y precisa en la base de datos seleccionadas, se utilizaron las siguientes ecuaciones de búsquedas de la tabla 2 para abordar la pregunta de investigación. Las palabras claves fueron extraídas de los componentes P(Población), I(Intervención), C(Contexto), O(Resultados)

TABLA II
 ECUACIÓN DE BÚSQUEDA

Base de Datos	Ecuación
IEEE Xplore	("Pharmaceutical Industry" OR "Pharma 4.0" OR "Industry 4.0" OR "Pharmaceutical Supply Chain" OR Pharmaceutical OR Pharma) AND ("Machine Learning" OR "Neural Networks" OR "Deep Learning" OR "Computer Vision" OR "Predictive Model" OR LSTM OR "Prescriptive Model" OR "Artificial Intelligence" OR NLP OR Blockchain OR "Faster R-CNN" OR "Image recognition") AND ("Visibility" OR "Prediction" OR "Automation" OR "Security" OR "Traceability" OR "Innovation" OR "Regulatory" OR "High Cost" OR "Data Quality" OR "Transparency") AND ("Planning" OR "Procurement" OR "Logistic" OR "Manufacturing" OR "Storage" OR "Supply Chain" OR "Transport" OR "Distribution" OR "Asia" OR "Europe" OR "Latin America" OR "Africa" OR "United States")
Web of Science	TS=("Pharmaceutical Industry" OR "Pharma 4.0" OR "Industry 4.0" OR "Pharmaceutical Supply Chain" OR "Pharmaceutical" OR "Pharma") AND TS=("Machine Learning" OR "Neural Networks" OR "Deep Learning" OR "Computer Vision" OR "Predictive Model" OR "LSTM" OR "Prescriptive Model" OR "Artificial Intelligence" OR "NLP" OR "Blockchain" OR "Faster R-CNN" OR "Image recognition") AND TS=("Visibility" OR "Prediction" OR "Automation" OR "Security" OR "Traceability" OR "Innovation" OR "Regulatory" OR "High Cost" OR "Data Quality" OR "Transparency") AND TS=("Planning" OR "Procurement" OR "Logistic" OR "Manufacturing" OR "Storage" OR "Supply Chain"

	OR "Transport" OR "Distribution" OR "Asia" OR "Europe" OR "Latin America" OR "Africa" OR "United States") AND PY=(2020-2025)
Scopus	(TITLE-ABS-KEY("Pharmaceutical Industry" OR "Pharma 4.0" OR "Industry 4.0" OR "Pharmaceutical Supply Chain" OR "Pharmaceutical OR Pharma) AND TITLE-ABS-KEY("Machine Learning" OR "Neural Networks" OR "Deep Learning" OR "Computer Vision" OR "Predictive Model" OR LSTM OR "Prescriptive Model" OR "Artificial Intelligence" OR "NLP" OR "Blockchain" OR "Faster R-CNN" OR "Image recognition") AND TITLE-ABS-KEY("Visibility" OR "Prediction" OR "Automation" OR "Security" OR "Traceability" OR "Innovation" OR "Regulatory" OR "High Cost" OR "Data Quality" OR "Transparency") AND TITLE-ABS-KEY("Planning" OR "Procurement" OR "Logistic" OR "Manufacturing" OR "Storage" OR "Supply Chain" OR "Transport" OR "Distribution" OR "Asia" OR "Europe" OR "Latin America" OR "Africa" OR "United States")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2026 AND (LIMIT-TO (OA,"all")) AND (LIMIT-TO (PUBSTAGE,"final")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar"))

Con el propósito de asegurar un proceso riguroso, transparente y coherente en la revisión sistemática de la literatura, se adoptó la metodología PRISMA. Asimismo, se definió los siguientes criterios de inclusión (CI) para determinar que artículos serían considerados relevantes: CI01: Estudios que aborden el uso de tecnologías de IA dentro del contexto de la cadena de suministro; CI02: Estudios que describan la aplicación de la IA en al menos una etapa de la cadena de suministro; CI03: Estudios que presenten los beneficios y limitaciones del uso de la IA en el sector farmacéutico. Por otro lado, los criterios de exclusión fueron: CE01: Estudios centrados en sectores industriales ajenos al farmacéutico o que no esté alineado a la Industria 4.0; CE02: Estudios que no presentan beneficios, limitaciones o mejoras cuantificables en la trazabilidad de productos de la cadena de suministro; CE03: Estudios que no hayan sido citados en los 2 últimos años. Se recopilaron 1731 artículos provenientes de las bases de datos SCOPUS (870), Web of Science (679) e IEEE Xplore (182) como parte de este estudio, utilizando la metodología PRISMA. En una primera etapa, se procedió a la eliminación de 540 artículos duplicados, lo que redujo al total de 1191 artículos únicos. A continuación, se evaluaron los títulos y resúmenes para determinar su pertinencia con el objeto de investigación, aplicando los criterios de inclusión definidos previamente. Para facilitar la identificación de publicaciones relevantes, se aplicó un primer filtro a través de una formula en Excel que se muestra en la tabla 3 que permitió detectar aquellos artículos cuyos títulos o resúmenes contenían términos como "pharmaceutical" o "supply chain" o "drug" o "traceability" o "industry 4.0": Esta estrategia ayudó a enfocar la búsqueda en estudios relacionados a nuestro tema de investigación donde se excluyeron 760 quedando 431 artículos disponible. Posterior a ello, se excluyeron 300 artículos, ya que muchos de ellos se centraban en otros sectores industriales como la agricultura, aviación, alimentaria y la manufactura general, no especificaban el uso de la inteligencia artificial en etapas concretas de la cadena de suministro y presentaban enfoques conceptuales de la IA. Esta revisión inicial permitió seleccionar 131 artículos considerados pertinentes. Luego, se realizó una revisión completa de los textos y se aplicaron los criterios de exclusión, identificando que 70 estudios no cumplían con el criterio CE02 y 1 estudios no cumplían el criterio CE03. En consecuencia, se excluyeron

71 artículos adicionales, quedando un total de 60 artículos para el análisis final. El procedimiento de selección se muestra en la siguiente Figura 1.

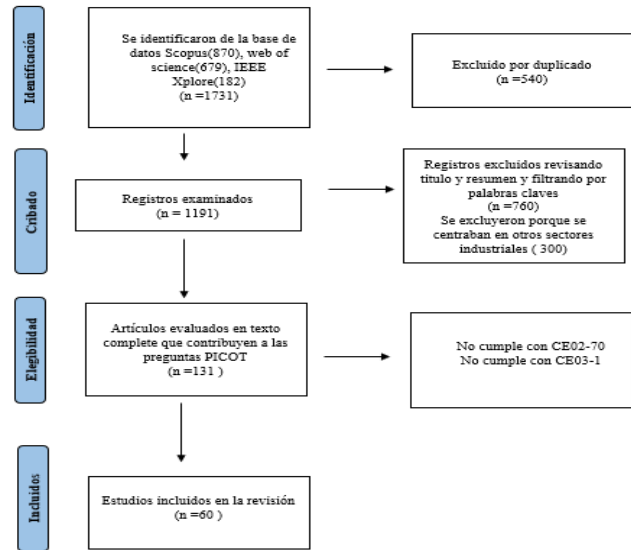


Fig. 1. Diagrama de flujo PRISMA para selección y extracción de datos.

III. RESULTADOS

A. Organización de la información

En la Fig. 2 se puede evidenciar la distribución de los artículos seleccionados según su año de publicación. Se observa que la cantidad de artículos publicados ha fluctuado a lo largo de los años, mostrando una tendencia general de crecimiento desde 2020 hasta un pico en 2023, seguido de una disminución en los años posteriores. Específicamente, en 2020, se publicaron 6 artículos, y esta cifra aumentó a 10 en 2021. Aunque hubo una ligera disminución a 9 artículos en 2022, el año 2023 marcó el pico de publicaciones con 15 artículos. Posteriormente, se observa una reducción en la cantidad de publicaciones, con 13 artículos en 2024 y, hasta la fecha, 7 artículos en 2025.



Fig. 2 Cantidad de publicaciones

B. Fuentes de información

La distribución de los artículos seleccionados según la fuente de donde provienen. Se evidenció claramente que la mayoría de los artículos se encuentran indexados en bases de datos reconocidas por su amplio alcance en la investigación científica. La fuente con la mayor cantidad de artículos es Web of Science, que cuenta con 30 publicaciones. Muy de cerca le

sigue Scopus, con 28 artículos. Por último, la base de datos IEEE Xplore presenta una cantidad significativamente menor, con solo 2 artículos.

C. Población ¿Cómo se define la industria farmacéutica por la aplicación de tecnologías emergentes en la cadena de suministro?

Como se muestra en la tabla 3, la industria farmacéutica, en su proceso de transformación digital, se redefine profundamente gracias a la aplicación de tecnologías emergentes en la cadena de suministro. Desde la perspectiva del Pharmaceutical Supply Chain, se conceptualiza como un ecosistema descentralizado que utiliza blockchain y smart contracts para garantizar la trazabilidad de los medicamentos desde su origen hasta el paciente final [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14]. Estas tecnologías permiten superar los sistemas tradicionales, eliminando puntos únicos de fallo y automatizando verificaciones críticas en tiempo real [15], [16]. Ejemplos como el uso de IPFS y Ethereum autentican lotes mediante firmas digitales, lo que resulta esencial en regiones con altos índices de falsificación, como India y Pakistán [17], [18]. Además, algoritmos de consenso avanzados, como P-PBFT, mejoran la escalabilidad y eficiencia en redes con miles de nodos, facilitando la trazabilidad a gran escala [19], [20]. Los estudios también resaltan la integración de plataformas como Hyperledger Fabric y Sawtooth, que optimizan la utilización de recursos en escenarios de alto volumen transaccional [21], [22], [23], [24]. En el marco de Industria 4.0, la industria farmacéutica se concibe como un sistema interconectado que integra blockchain, inteligencia artificial (IA), IoT y sensores para optimizar la producción, distribución y planificación estratégica [25], [26], [27]. Estas tecnologías permiten la interoperabilidad entre actores globales y el cumplimiento automatizado de normativas internacionales como DSCSA y GDPR [28], [29], [30]. Modelos de deep learning y redes neuronales permiten predecir la demanda y detectar anomalías en la cadena de frío con una precisión superior al 87% [31], [32]. Además, se destaca la migración desde sistemas ERP tradicionales hacia arquitecturas distribuidas que mejoran la eficiencia operativa y la transparencia [33], [34], [35], [36]. Bajo el enfoque de Pharma 4.0, la industria evoluciona hacia un ecosistema inteligente que incorpora gemelos digitales, IoT e IA para el control en tiempo real de la cadena de suministro [37], [38], [39]. Los sensores IoT monitorean variables críticas como temperatura y humedad durante el transporte de vacunas, generando alertas automáticas ante desviaciones para proteger la integridad de los productos [40]. Los gemelos digitales permiten reproducir con exactitud los procesos de manufactura, garantizando así el cumplimiento de estándares regulatorios como FDA 21 CFR [41]. Además, la adopción de smart contracts permite automatizar pagos y verificaciones de calidad, logrando una reducción de costos operativos de hasta un 40% frente a sistemas tradicionales [42], [43], [44], [45], [46]. En el ámbito de Automatización e IA, la industria farmacéutica se reconfigura como una cadena de suministro predictiva y autónoma [47], [48], [49], [50]. Algoritmos de machine learning analizan datos históricos de demanda, variables ambientales y patrones epidemiológicos

para predecir necesidades de inventario con una precisión del 90%, minimizando desabastecimientos y excesos de stock [51], [52]. Aplicaciones móviles con asistentes inteligentes optimizan rutas logísticas y gestión de inventarios, mientras que smart contracts autoactualizables detectan y corrigen anomalías en tiempo real [53], [54], [55]. Estos desarrollos no solo incrementan la eficiencia, sino que también fortalecen la capacidad de respuesta ante interrupciones en la cadena de suministro global. Finalmente, desde la óptica de Trazabilidad y Seguridad, la industria farmacéutica se define como un sistema antifalsificación robusto [56], [57], [58]. Blockchain, en conjunto con técnicas criptográficas como Zero-Knowledge Proofs, permite validar la autenticidad de medicamentos sin exponer datos sensibles [59], [60], [61]. Soluciones innovadoras como el uso de NFTs tokenizan lotes de medicamentos, habilitando verificaciones en tiempo real durante el transporte y mejorando la seguridad en regiones con alta incidencia de falsificaciones [62], [63], [64]. Además, algoritmos de búsqueda en grafos acíclicos aceleran la localización de productos en cadenas complejas, reduciendo los tiempos de auditoría y respuesta [65], [66], [67]. En conjunto, la aplicación de estas tecnologías emergentes redefine la industria farmacéutica como un entorno altamente digitalizado, seguro y resiliente. La evolución hacia arquitecturas distribuidas, impulsadas por blockchain, IA e IoT, sienta las bases para un modelo de cadena de suministro más eficiente, transparente y colaborativo, capaz de enfrentar desafíos como las falsificaciones, la fragmentación de datos y las interrupciones logísticas a escala global [13], [16].

TABLA III
DEFINICIÓN DE LA INDUSTRIA FARMACÉUTICA POR LA
APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS EMERGENTES.

Término	Artículos	Definición
Pharmaceutical Supply Chain	[8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [19], [20], [17],[18],[21], [22], [23], [24]	Exploran cómo blockchain y smart contracts transforman la cadena de suministro farmacéutica, mejorando trazabilidad, eficiencia y seguridad desde fabricación hasta distribución global.
Industria 4.0	[25], [26], [27], [35], [36], [28], [29], [30], [31], [32], [33] [34],	Analizan cómo la Industria 4.0 redefine la farmacéutica con interoperabilidad, IA, blockchain y sensores para mejorar producción, distribución y planificación estratégica a gran escala.
Pharma 4.0	[37], [38], [39], [42], [43], [44], [45], [40], [41], [46]	Describen la integración de tecnologías avanzadas (IoT, IA, blockchain, gemelos digitales) para digitalizar procesos farmacéuticos y garantizar trazabilidad y control en tiempo real.
Automatización e IA	[47], [48], [49], [50], [51], [53], [54], [55], [52]	Abordan el uso de inteligencia artificial, aprendizaje automático y smart contracts para automatizar procesos logísticos, optimizar inventarios y mejorar la eficiencia operativa.
Trazabilidad y Seguridad	[56], [57], [58], [62], [63], [65], [64], [66], [67], [59], [60], [61]	Se enfocan en combatir falsificaciones y garantizar autenticidad de medicamentos usando blockchain, IoT, Zero-Knowledge Proofs y algoritmos de

		búsqueda para trazabilidad granular.
--	--	--------------------------------------

D. Intervención ¿Qué tecnologías de IA se han aplicado para mejorar la trazabilidad de productos en la cadena de suministros farmacéutica?

En la tabla 4, se evidencia, la aplicación de tecnologías de inteligencia artificial (IA) para mejorar la trazabilidad en la cadena de suministros farmacéutica ha evolucionado significativamente, integrando enfoques avanzados en múltiples niveles: En primer lugar, destacan las Redes Neuronales. Se han utilizado Generative Adversarial Networks (GANs) y Convolutional Neural Networks (CNNs) para detectar variaciones en empaques de medicamentos y asegurar la autenticidad con precisiones superiores al 95% [56]. Además, un sistema basado en Deep Belief Networks (DBN), combinado con técnicas de optimización como Tasmanian Devil Optimization, permite predecir la logística de entrada y ajustar hiperparámetros para mejorar el rendimiento [25]. Complementariamente, redes neuronales profundas (DSN-BR) se aplican en visión artificial para segmentar defectos en empaques, logrando métricas de desempeño como un MIoU de 90.5% y un F1-Score de 98.25% [52]. En segundo lugar, el Machine Learning se ha empleado para optimizar la gestión de inventarios mediante modelos como XGBoost, ARIMA y Random Forest, que predicen ventas estacionales y detectan anomalías en datos transaccionales [22], [48], [55]. Algoritmos supervisados como KNN, SVM y Naïve Bayes, junto con técnicas evolutivas (ACO, FA), han permitido minimizar errores en estimaciones de costos logísticos [45]. En el área de Visión por Computadora, los sistemas de inspección automatizada utilizan IA para detectar defectos en productos y monitorear condiciones de almacenamiento en tiempo real (humedad, temperatura), reemplazando procesos manuales [42], [46], [52]. Por su parte, la integración de Blockchain y Smart Contracts ha revolucionado la trazabilidad mediante el registro inmutable de transacciones, verificación de procedencia, y detección de anomalías. Ethereum e Hyperledger Fabric son plataformas clave para implementar contratos inteligentes que automatizan la redistribución de medicamentos [8], [57], [10], [47], [12], [13], [28], [54], [18], [61]. Algunos sistemas incorporan IA para análisis predictivo de patrones de falsificación y para validar datos IoT en tiempo real [9], [11], [62], [65], [14], [15], [30], [66], [16], [53], [60]. El IoT Integrado se combina con IA y blockchain para rastrear medicamentos en tiempo real, mejorar la visibilidad en la cadena y predecir riesgos mediante análisis de datos de sensores (temperatura, ubicación) [19], [11], [26], [40], [24]. En cuanto a la Optimización Avanzada, algoritmos metaheurísticos como Greedy Human Optimization y Spotted Hyena Optimizer se usan para optimizar rutas de distribución y gestión de inventario, integrando IA y blockchain para recomendaciones de medicamentos [44], [50], [51]. El Modelado Avanzado con técnicas como Federated Learning permite entrenar modelos IA descentralizados, garantizando privacidad y trazabilidad en líneas de producción farmacéutica [21], [23], [38], [41]. Además, se ha explorado el uso de NFTs y Tokenización para representar medicamentos como activos digitales en redes

blockchain (ERC-721), facilitando la autenticidad y transferencia de propiedad, aunque con un enfoque limitado en logística [37], [67]. Finalmente, los enfoques complementarios abarcan el uso de agentes inteligentes, algoritmos mejorados de consenso (PBFT) y blockchain para fortalecer la integridad de datos y la escalabilidad de la trazabilidad farmacéutica [27], [35], [36], [64], [31], [19], [20], [32], [33], [34].

TABLA IV
TECNOLOGÍAS EMERGENTES APLICADAS A LA CADENA DE SUMINISTRO DEL SECTOR FARMACÉUTICO

Tecnología	Artículos	Descripción de la tecnología
Redes Neuronales	[56], [25], [52]	Detección de falsificaciones mediante análisis de empaques con alta precisión. Optimización logística mediante metaheurísticas. Inspección automatizada de defectos en packaging farmacéutico.
Machine Learning	[22], [48], [29], [45], [55]	Predicción de demanda estacional y optimización de inventarios. Detección de anomalías en transacciones. Minimización de costos logísticos mediante algoritmos evolutivos.
Visión por Computadora	[42], [63], [46], [52]	Verificación automatizada de códigos y productos. Monitoreo de condiciones de almacenamiento. Detección de defectos en empaques mediante segmentación de imágenes.
Blockchain + Smart Contracts	[8], [9], [57], [10], [58], [47], [12], [62], [43], [49], [13], [65], [28], [14], [15], [30], [66], [16], [53], [54], [60], [18], [61]	Trazabilidad inmutable de medicamentos. Autenticación descentralizada. Automatización de procesos regulatorios. Gestión segura de identidades. Implementación de estándares globales.
IoT Integrado	[19], [11], [26], [40], [24]	Monitoreo en tiempo real de cadena de frío. Validación de condiciones de almacenamiento. Recolección de datos para análisis predictivo.
Optimización Avanzada	[44], [50], [51]	Mejora de rutas de distribución. Ajuste automático de hiperparámetros. Optimización de recomendaciones de inventario.
Modelado Avanzado	[21], [23], [38], [41]	Simulación de ensayos clínicos. Predicción de metabolismo de fármacos. Modelado de respuestas a tratamientos. Entrenamiento descentralizado con privacidad preservada.
NFTs + Tokenización	[37], [67]	Representación digital de activos farmacéuticos.

		Creación de mercados descentralizados. Base para futuros modelos predictivos.
Enfoques Complementarios	[27], [35], [36], [64], [31], [19], [20], [32], [33], [34]	Análisis teóricos de implementación. Optimización de protocolos de consenso. Automatización basada en reglas. Estudios generales sobre adopción tecnológica.

E. Comparación ¿Cómo se comparan los modelos y tecnologías tradicionales utilizados en las etapas de cadena de suministro con las soluciones basadas en inteligencia artificial dentro de la cadena de suministro farmacéutica?

La cadena de suministro farmacéutica tradicional se ha caracterizado por la utilización de sistemas centralizados, procesos manuales y tecnologías estáticas para la trazabilidad y control de calidad [56]. En esta perspectiva, los modelos tradicionales se basan en inspecciones visuales, códigos de barras, formularios físicos o registros en papel, que son altamente vulnerables a errores humanos, falsificaciones y demoras en la detección de anomalías [56], [8]. Por ejemplo, las inspecciones manuales presentan limitaciones tanto en precisión como en cobertura, mientras que la serialización basada en estándares como GS1 o RFID no permite predicciones logísticas en tiempo real ni trazabilidad automática [57], [49]. En contraste, las soluciones basadas en inteligencia artificial (IA), cuando se integran con blockchain y otras tecnologías emergentes, ofrecen automatización, escalabilidad y seguridad en tiempo real. Mediante el uso de algoritmos de aprendizaje profundo como CNN y GAN, es posible detectar defectos microscópicos en empaques farmacéuticos con alta precisión, lo cual reduce falsificaciones y mejora el control de calidad [56], [46], [52]. Adicionalmente, la IA combinada con redes blockchain permite auditorías inmutables y descentralizadas, superando las limitaciones de las bases de datos relacionales utilizadas tradicionalmente [8], [57], [64]. La serialización manual, por su parte, resulta frágil frente a fraudes o alteraciones, mientras que la implementación de modelos con contratos inteligentes y hash criptográficos garantiza la integridad de los datos [57], [64]. La tecnología blockchain integrada con inteligencia artificial ha permitido la creación de plataformas como BRUINchain, que escanean códigos 2D y consultan en tiempo real bases de datos distribuidas, reduciendo el tiempo de validación de productos de horas a minutos [42]. Asimismo, los sistemas de trazabilidad tradicionales, que funcionan en silos con hojas de cálculo o procesos ETL manuales, presentan cuellos de botella para la interoperabilidad. Frente a ello, soluciones como ACMS o Hyperledger Fabric combinan smart contracts con IA para validar datos provenientes del IoT, clasificar lotes defectuosos o detectar desviaciones de temperatura en tiempo real [39], [11], [13], [40]. Además, se ha demostrado que las arquitecturas tradicionales dificultan el cumplimiento normativo debido a sus procesos lentos y jerárquicos. En cambio, las DApps basadas en IA automatizan el cumplimiento regulatorio, ejecutando acciones como el retiro de lotes según condiciones dinámicas

[9], [28]. También se han desarrollado modelos con Deep Belief Networks optimizados por algoritmos evolutivos como SHO, que mejoran la predicción de demanda y sugieren ajustes logísticos automáticos, superando la planificación basada en estadísticas simples [25], [51], [45]. La IA también fortalece los sistemas de gestión de inventarios mediante análisis de variables externas como epidemias o estacionalidades, mientras blockchain audita el flujo de medicamentos y garantiza la trazabilidad [48], [55]. Por otro lado, la detección de anomalías en rutas o patrones de fraude puede ser automatizada mediante OCR, IoT y algoritmos de clasificación que analizan grandes volúmenes de datos históricos [63], [13]. En sistemas de manufactura, se han utilizado técnicas como federated learning, que permiten entrenar modelos distribuidos sin compartir datos sensibles, respetando la privacidad y la normatividad farmacéutica [41]. En cuanto a soluciones innovadoras, algunos artículos destacan el uso de smart contracts autoactualizables combinados con algoritmos de machine learning (Random Forest), capaces de adaptarse a nuevas formas de fraude como alteraciones en fechas de caducidad, una capacidad inexistente en modelos GS1 o RFID estáticos [55]. Incluso se han implementado modelos que integran Zero-Knowledge Proofs (ZKP) para garantizar auditoría sin comprometer la privacidad de los actores de la cadena [60]. La descentralización de las operaciones a través de múltiples actores se vuelve posible mediante modelos multirrama con control granular de acceso (CP-ABE), lo que elimina la dependencia de terceros de confianza en las verificaciones, frente a los modelos jerárquicos tradicionales [59]. Esto también se ve reflejado en propuestas que integran blockchain con DRA (autoridades reguladoras), en las que cada transacción es validada y registrada de manera inmutable, aumentando la transparencia y reduciendo el desvío de lotes hacia mercados ilegales [18]. Por último, se destaca que los métodos tradicionales de gestión de costos presentan altos márgenes de error en el cálculo de caducidad y almacenamiento, mientras que los algoritmos evolutivos de IA permiten ajustar dinámicamente los pesos de características críticas, logrando predicciones más precisas y decisiones financieras más informadas [45].

F. Resultados ¿Qué beneficios ha demostrado las soluciones de IA, y qué limitaciones presentan?

Las soluciones de Inteligencia Artificial (IA) en la trazabilidad farmacéutica han demostrado múltiples beneficios que abarcan desde mejoras en la autenticación de productos hasta optimización logística y regulatoria. Por ejemplo, las redes generativas antagónicas (GANs) se han utilizado para generar datos sintéticos que permiten entrenar modelos de detección de falsificaciones, mientras que las redes neuronales convolucionales (CNNs) alcanzan una precisión del 95% en la autenticación de empaques y a ello se suma la integración con blockchain, que garantiza registros inmutables [56]. Además, los contratos inteligentes permiten automatizar la redistribución de medicamentos no utilizados, lo cual reduce desperdicios y costos, a la vez que mejora la transparencia en el sistema al eliminar intermediarios [8]. Por otro lado, tecnologías como los NFTs aseguran la autenticidad única de cada lote, y redes profundas como las DBN logran un throughput logístico de

551.22 transacciones por segundo [25]. Las aplicaciones descentralizadas (DApps), por su parte, automatizan procesos regulatorios, reduciendo tiempos de aprobación y fortaleciendo la confianza entre partes interesadas [9]. También se ha demostrado que el almacenamiento de imágenes en IPFS junto con Ethereum facilita auditorías descentralizadas [57]. Asimismo, se ha evidenciado que la combinación de IA y blockchain mejora la detección de patrones de falsificación en un 30% y reduce los tiempos de verificación de días a minutos [39]. Otros estudios destacan que los sistemas basados en IA pueden alcanzar una precisión del 95% en la detección de medicamentos falsificados, automatizando hasta el 80% de los procesos de verificación [11], mientras que en procesos ETL, la IA disminuye los errores del 15% al 2% [47]. A nivel económico, se reporta que la IA reduce el tiempo de verificación de productos de una hora a un minuto, generando ahorros de hasta \$183 millones anuales en EE. UU. [42]. Además, optimiza la gestión de inventarios, reduciendo desabastecimientos en 40% y desperdicios en 25% [48]. La IA también ha sido clave en la optimización logística. Por ejemplo, permite optimizar en tiempo real las rutas de distribución, detecta desviaciones en la cadena de frío con 92% de precisión y reduce medicamentos falsificados mediante reconocimiento de patrones [44]. En sistemas más integrados, combinaciones de IoT, blockchain e IA logran una autenticación con 99.7% de precisión mediante OCR inteligente, automatizando pagos y reduciendo transacciones de días a minutos [63]. También se destaca la arquitectura Hyperledger con IA predictiva, que reduce en 35% las pérdidas por caducidad de medicamentos y mejora la seguridad en el acceso a datos mediante RBAC [13].

Además, los algoritmos de clustering identifican patrones de fraude con una precisión del 87%, y las soluciones IA-blockchain han reducido en 60% los tiempos de respuesta ante alertas regulatorias [28]. El modelo HDBN, optimizado con algoritmos heurísticos como SHO, ha incrementado la precisión en pronósticos de demanda del 75% al 94%, reduciendo inventario obsoleto en un 30% [51]. En términos de monitoreo, la integración con IoT permite controlar la temperatura en tiempo real, reduciendo pérdidas por degradación [40], mientras que técnicas como el aprendizaje federado permiten entrenar modelos sin comprometer la privacidad de los datos [41]. Otras implementaciones permiten incluso contratos autoactualizables que se adaptan automáticamente a nuevas amenazas [55]. En cuanto a limitaciones, muchas soluciones requieren grandes volúmenes de datos para entrenar modelos avanzados como GANs [56]. Además, la implementación de blockchain puede ser costosa para pequeñas y medianas empresas (PYMEs), y su complejidad técnica representa un reto para la comprensión de reguladores [56]. En el caso de Ethereum, su baja escalabilidad limita el uso de contratos inteligentes en escenarios de alta demanda [8], mientras que la generación de NFTs consume muchos recursos computacionales [25]. La interoperabilidad entre distintos blockchains sigue siendo un obstáculo técnico importante [9], así como la integración con sistemas heredados (legacy), que presentan barreras operativas [57][42][44]. La dependencia de la calidad de los datos y la necesidad de capacitación técnica especializada son limitaciones recurrentes [47][48][59]. La

sensibilidad de los sensores IoT a condiciones ambientales extremas puede generar falsos positivos [63], mientras que la latencia en la sincronización de datos entre stakeholders puede retrasar decisiones hasta por 48 horas [13]. El mantenimiento de estos sistemas también puede ser costoso, superando los \$200,000 anuales en redes medianas [28]. Además, se requiere una base histórica amplia —al menos cinco años de datos— para que modelos como HDBN funcionen de manera óptima [51]. Otros estudios han señalado el alto costo computacional de la optimización evolutiva [45], las dificultades para escalar redes con grandes volúmenes de datos IoT [67], y el riesgo de vendor lock-in en plataformas específicas como Ethereum [54]. También se cuestiona el alto consumo energético de ciertos protocolos de consenso [9][60][63], y la complejidad técnica para actualizar contratos inteligentes una vez desplegados [54].

FRAMEWORK CONCEPTUAL PROPUESTO: BLOCKCHAIN + IA EN LA TRAZABILIDAD FARMACÉUTICA

A. PRODUCCIÓN Y CONTROL DE CALIDAD

En esta etapa, Blockchain se utiliza para registrar de manera inmutable cada lote producido, incluyendo detalles como origen de materias primas, condiciones de fabricación y certificaciones de calidad. Por ejemplo, plataformas como Hyperledger Fabric permiten la auditoría descentralizada de procesos [13]. Por otro lado, la IA se aplica mediante redes neuronales convolucionales (CNN) para inspección visual de empaques y detección de defectos, alcanzando precisiones del 95%. La sinergia entre ambas tecnologías permite no solo garantizar la autenticidad, sino también predecir fallas en la producción antes de que ocurran.

B. ALMACENAMIENTO Y LOGÍSTICA

El almacenamiento de medicamentos, especialmente aquellos sensibles a la temperatura, se beneficia de la combinación de IoT, Blockchain e IA. Sensores IoT monitorean condiciones ambientales, registrando datos en una blockchain que asegura su inmutabilidad [40]. Modelos de IA como ARIMA y XGBoost predicen demandas estacionales y optimizan niveles de inventario, reduciendo desperdicios hasta en un 25% [48]. Este enfoque ha sido implementado con éxito en países como Arabia Saudita y Kenia, donde la infraestructura logística es crítica para la distribución de vacunas [46].

C. DISTRIBUCIÓN Y TRANSPORTE

Durante la distribución, Blockchain ofrece trazabilidad en tiempo real de la cadena de frío mediante smart contracts que alertan sobre desviaciones [63]. La IA complementa este proceso con algoritmos de optimización de rutas y detección de patrones de fraude. Por ejemplo, en India, se han usado redes neuronales recurrentes (LSTM) para predecir interrupciones logísticas con un 92% de precisión [44].

D. FARMACIAS Y HOSPITALES

En farmacias, Blockchain autentica medicamentos mediante códigos QR escaneados por aplicaciones móviles, como se ha hecho en EE.UU. bajo el marco del DSCSA [42]. La IA gestiona inventarios mediante modelos predictivos que consideran variables como epidemias o estacionalidades, mejorando la disponibilidad de medicamentos esenciales [51].

E. PACIENTE FINAL

Para el paciente, Blockchain garantiza transparencia y seguridad en el acceso a la historia integral del medicamento permitiéndole verificar su autenticidad [37],[67]. Esta tecnología, implementada en plataformas como Ethereum mediante contratos inteligentes, asegura que cada transacción y movimiento del fármaco quede registrado de forma inmutable y descentralizada, de tal forma que el paciente recibe acceso de solo lectura al sistema, lo que le otorga la capacidad de rastrear y confirmar la procedencia legítima de su tratamiento de manera autónoma. Así, se convierte en el último eslabón verificado de una cadena de suministro confiable y resistente a fraudes. [10]

V. DISCUSIÓN

La revisión de la literatura revela que la aplicación de la inteligencia artificial y blockchain está redefiniendo conceptualmente la industria farmacéutica, transitando desde un sector definido por la producción y distribución física hacia un ecosistema digitalizado, seguro y basado en datos [8], [9]. En contraste con su definición tradicional, ligada al cumplimiento de estrictas normativas [1], los estudios más recientes la describen por su capacidad de garantizar esa seguridad a través de la trazabilidad inmutable que ofrece blockchain [56], [57], la optimización predictiva de la IA y el monitoreo en tiempo real del IoT. Esta evolución, enmarcada en el paradigma de Pharma 4.0 [37], [38], responde directamente a vulnerabilidades históricas como la falsificación, el desabastecimiento y la falta de transparencia en la cadena de suministro [17], [18]. A nivel técnico, esta transformación se materializa a través de un arsenal diverso de técnicas de IA, donde cada rama aborda una vulnerabilidad específica. Modelos de Aprendizaje Automático como XGBoost y Random Forest se han consolidado como herramientas predictivas para optimizar la gestión de la demanda y los inventarios [22], [48], [55], mientras que el Aprendizaje Profundo y la Visión por Computador actúan como una línea de defensa reactiva, detectando con alta precisión, superior al 95%, productos falsificados o defectos en empaques [52], [56]. Sin embargo, el análisis evidencia que la transformación más profunda surge de la integración sinérgica de la IA con Blockchain e IoT. Esta hibridación indica una madurez en el campo, donde el verdadero avance no radica en la potencia de un algoritmo individual, sino en la arquitectura de un sistema compuesto que combina la inteligencia de la IA con la integridad de Blockchain y la ubicuidad del IoT [11], [19], [40]. Al contrastar estos hallazgos con otras revisiones publicadas en bases internacionales, se observa que el alcance de la presente investigación es más amplio. Estudios previos se han centrado únicamente en inteligencia artificial aplicada a la resiliencia de la cadena farmacéutica [68], mostrando importantes avances en predicción de inventarios y optimización logística, pero sin integrar blockchain como soporte de seguridad y transparencia. De manera complementaria, otras investigaciones se enfocaron exclusivamente en los desafíos de adopción de blockchain [69], [71], identificando limitaciones como los altos costos iniciales, la ausencia de marcos regulatorios consolidados y la falta de

interoperabilidad entre plataformas, sin considerar la complementariedad de la IA ni el impacto en procesos específicos de la industria farmacéutica. La revisión sobre la gestión de cadenas farmacéuticas en países en desarrollo [70] refuerza esta perspectiva al subrayar que los problemas estructurales, infraestructura limitada, escasez de personal especializado y debilidad normativa, constituyen un freno significativo para la implementación de nuevas tecnologías. En paralelo, el análisis presentado en Quantum of Trust [72] extiende el debate hacia las cadenas de suministro alimentarias además de la farmacéutica, concluyendo que blockchain tiene potencial para fortalecer la autenticidad y la confianza en mercados globales, aunque su abordaje se mantiene en gran medida conceptual y carente de experiencias prácticas. Frente a estas aproximaciones, la presente revisión aporta un valor diferencial al integrar blockchain e IA en un mismo marco, con un horizonte temporal actualizado hasta 2025 y un enfoque sectorial específico en farmacéutica, lo que permite evidenciar una sinergia tecnológica y una aplicabilidad que no se encuentran en la mayoría de las revisiones previas. Asimismo, el análisis de los casos de implementación en países en desarrollo demuestra que el debate no puede quedarse únicamente en la teoría. En Kenia [46], la utilización de modelos de inteligencia artificial apoyados en infraestructura de cloud computing permitió reducir en un 40% los errores en la verificación de calidad, lo que confirma la viabilidad técnica incluso en entornos con limitaciones económicas. En Omán [23], la experiencia de un modelo de consorcio basado en Ethereum, donde el Ministerio de Salud actuó como nodo regulador, evidenció que es posible articular soluciones de gobernanza descentralizada de bajo costo. En India [17] y Pakistán [18], las iniciativas centradas en combatir la falsificación mediante blockchain y códigos QR validaron la aplicabilidad de estas tecnologías, aunque también mostraron que la alfabetización digital y la integración con sistemas heredados son barreras críticas. Estos resultados son coherentes con lo señalado en revisiones anteriores [28], [64], [69], [71], que reconocen que los mayores retos para la adopción no se ubican en la capacidad tecnológica, sino en la preparación organizacional, la voluntad política y la adecuación regulatoria.

La comparación entre estas experiencias y las revisiones previas permite sostener que el principal aporte de la presente investigación radica en aterrizar los hallazgos a escenarios reales, en lugar de limitarse a un análisis conceptual. Mientras que otras revisiones destacan el potencial de blockchain o IA de manera aislada, este trabajo demuestra que la convergencia de ambas tecnologías genera beneficios tangibles en autenticación, trazabilidad y eficiencia logística, siempre que se acompañe de estrategias adaptadas a las condiciones de cada contexto. De esta forma, la presente revisión contribuye no solo a ampliar el conocimiento teórico, sino también a ofrecer una base práctica para investigadores, responsables de políticas públicas y empresas del sector que buscan implementar soluciones innovadoras en entornos de recursos limitados. Pese a que los beneficios de esta arquitectura integrada son transformadores, como la reducción de tiempos de verificación de horas a segundos [42] y precisiones de hasta el 99.7% en la

autenticación de productos [63], la literatura evidencia una paradoja central que recorre toda la investigación: la eficiencia prometida por la tecnología choca frontalmente con las ineficiencias estructurales del ecosistema. La interoperabilidad sigue siendo un desafío mayúsculo, donde la dificultad para integrar plataformas heterogéneas [42], [44], [57] y la resistencia organizacional al cambio actúan como un freno significativo. Esta dicotomía es, quizás, el hallazgo más crítico: la tecnología ya es capaz de ofrecer soluciones altamente eficientes, pero su implementación a gran escala se ve obstaculizada por barreras que no son tecnológicas, sino humanas, organizacionales y regulatorias. Este despliegue táctico de tecnologías se manifiesta de forma distinta en cada etapa de la cadena y en diferentes geografías. En la manufactura, la IA se enfoca en la integridad del proceso productivo [25], [52], mientras que, en la distribución y logística, el foco se desplaza hacia la integridad del producto en tránsito [42], [67]. Geográficamente, los impulsores de la adopción también varían: en Estados Unidos, la investigación está fuertemente motivada por el cumplimiento regulatorio del DSCSA [28], [29]; en Asia, es una respuesta directa a la alta prevalencia de medicamentos falsificados [17], [18]; y en Europa, el debate se centra en armonizar la innovación con estrictas normativas de privacidad como el GDPR [28], [29], [30]. Esta divergencia de motivaciones es un hallazgo clave, pues indica que no existe un enfoque global unificado, sino una serie de ecosistemas de innovación que responden a presiones locales.

VI. CONCLUSIÓN

La presente revisión sistemática de la literatura ha respondido al objetivo de analizar el estado actual y el impacto de la inteligencia artificial (IA) en la trazabilidad de la cadena de suministro farmacéutica. Se identificaron múltiples aplicaciones de tecnologías emergentes como blockchain, IoT, redes neuronales y smart contracts, las cuales están redefiniendo el sector hacia un ecosistema más eficiente, seguro y resiliente. Los principales hallazgos evidencian que la integración de IA en conjunto con blockchain permite una autenticación robusta de medicamentos, optimización logística y detección temprana de anomalías en tiempo real, reduciendo pérdidas por falsificaciones y mejorando la transparencia en entornos regulatorios exigentes. Esta revisión contribuye a la literatura al proporcionar una visión integral que abarca desde la producción hasta la distribución, demostrando cómo estas tecnologías superan las limitaciones de los sistemas tradicionales centralizados. No obstante, persisten desafíos significativos, como los altos costos de implementación, la interoperabilidad con sistemas legacy, el consumo energético de ciertas tecnologías y la necesidad de capacitación técnica para un uso efectivo. Estos aspectos limitan la adopción masiva, especialmente en regiones con recursos limitados. Como vías futuras, se recomienda explorar soluciones interoperables de bajo costo, la aplicación de modelos de aprendizaje federado para proteger la privacidad de datos y el diseño de políticas públicas que impulsen la adopción de estas tecnologías en países en desarrollo. Además, será crucial fomentar la colaboración entre actores del sector para consolidar un

ecosistema global de trazabilidad farmacéutica verdaderamente digitalizado.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Se agradece a la universidad y los docentes por sus enseñanzas y motivación hacia la investigación y un reconocimiento al esfuerzo contante de implementar bases de datos para investigar.

REFERENCES

- [1] N. A. Roy et al., "Artificial Intelligence in pharmaceutical supply chain management: A systemic review", *World Journal of Biology Pharmacy and Health Sciences*, vol. 21, no. 1, pp. 204–213, Jan. 2025, doi: 10.30574/wjbphs.2025.21.1.1088.
- [2] G. M. Razak, L. C. Hendry, and M. Stevenson, "Supply chain traceability: a review of the benefits and its relationship with supply chain resilience", *Production Planning & Control*, vol. 34, no. 11, pp. 1114–1134, oct. 2021, doi: 10.1080/09537287.2021.1983661.
- [3] B. Honti, A. Farkas, Z. K. Nagy, H. Pataki, and B. Nagy, "Explainable deep recurrent neural networks for the batch analysis of a pharmaceutical tableting process in the spirit of Pharma 4.0", *Journal of Medical Signals & Sensors*, vol. 662, no. 1, pp. 1–11, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.jipharm.2024.124509.
- [4] M. J. Tavakoli et al., "Enhancing Pharmacy Warehouse Management With Faster R-CNN for Accurate and Reliable Pharmaceutical Product Identification and Counting", *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, Jan. 2025, doi: 10.1155/int8883735.
- [5] M. Ashraf, A. Eltaawil, and I. Ali, "Disruption detection for a cognitive digital supply chain twin using hybrid deep learning", *Oper Res Int*, vol. 24, no. 23, pp. 1–31, May 2024, doi: 10.1007/s12351-024-00831-y.
- [6] M. Jahani et al., "Isfahan Artificial Intelligence Event 2023: Drug Demand Forecasting", *Journal of Medical Signals & Sensors*, vol. 15, no. 1, pp. 1–5, Jan. 2025, doi: 10.4103/jmss.jmss_59_24.
- [7] Subharun Pal, Gargee Banerjee, Abhishek Bajaj, Dr. Sunita Tank, Bharat Kumar Tank, "The Impact of AI on Global Supply Chain Management: A Review of Literature", *SEEJPH*, vol. 26, no. 1, pp. 3579–3597, Feb. 2025, doi: 10.70135/seejph.vi.4559
- [8] M. Debe, K. Salah, R. Jayaraman, and J. Arshad, "Blockchain-Based Verifiable tracking of resellable returned drugs," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 205848–205862, Jan. 2020, doi: 10.1109/access.2020.3037363.
- [9] V. Pareek, D. Saran, L. Sharma, P. Jakhar, and S. Kumar, "Blockchain technology in pharmaceutical industry: A review of recent research articles on PubMed," *SCRIPTA MEDICA*, vol. 55, no. 3, pp. 357–369, Jan. 2024, doi: 10.5937/scriptamed55-47100.
- [10] S. Ali, W. Anwar, B. J. Salem, and M. A. Dhuhli, "Tracing pharmaceutical products utilizing blockchain technologies," *International Journal of Computing and Digital Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 1174–1181, Oct. 2022, doi: 10.12785/ijcds/120193.
- [11] N. Zakari et al., "Blockchain technology in the pharmaceutical industry: a systematic review," *PeerJ Computer Science*, vol. 8, p. e840, Mar. 2022, doi: 10.7717/peerj-cs.840.
- [12] E. Fernando, M. Meyliana, H. L. H. S. Warnars, and E. Abdurachman, "Blockchain Technology for Tracing Drug with a Multichain Platform: Simulation Method," *Advances in Science Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 765–769, Feb. 2021, doi: 10.25046/aj060184.
- [13] V. Verma, "Unveiling the power of blockchain in pharmaceutical supply chains: Strengthening security and improving drug traceability," *El-Cezeri Fen Ve Mühendislik Dergisi*, May 2024, doi: 10.31202/ecjse.1338782.
- [14] V. Crossland, C. Dellwo, G. Bashar, and G. G. Dagher, "Janus: Toward preventing counterfeits in supply chains utilizing a multi-quorum blockchain," *Blockchain Research and Applications*, vol. 4, no. 4, p. 100157, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.bcr.2023.100157.
- [15] S. S. Gomasta, A. Dhali, T. Tahlil, Md. M. Anwar, and A. B. M. S. Ali, "PharmaChain: Blockchain-based drug supply chain provenance verification system," *Heliyon*, vol. 9, no. 7, p. e17957, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17957.
- [16] A. Musamih et al., "A Blockchain-Based approach for drug traceability in healthcare supply chain," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 9728–9743, Jan. 2021, doi: 10.1109/access.2021.3049920.
- [17] B. K. Rai, "BBTCD: blockchain based traceability of counterfeited drugs," *Health Services and Outcomes Research Methodology*, vol. 23, no. 3, pp. 337–353, Nov. 2022, doi: 10.1007/s10742-022-00292-w.
- [18] M. Humayun, N. Z. Jhanjhi, M. Niazi, F. Amsaad, and I. Masood, "Securing Drug Distribution Systems from Tampering Using Blockchain," *Electronics*, vol. 11, no. 8, p. 1195, Apr. 2022, doi: 10.3390/electronics11081195.
- [19] S. Liu, R. Zhang, C. Liu, and D. Shi, "P-PBFT: An improved blockchain algorithm to support large-scale pharmaceutical traceability," *Computers in Biology and Medicine*, vol. 154, p. 106590, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.combiomed.2023.106590.
- [20] C. M. N. Sudha and J. V. N. J., "TrackChain: Hyperledger based pharmaceutical supply chain – Resource utilization perspective," *Heliyon*, vol. 10, no. 1, p. e23250, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e23250.
- [21] L. Cucurull-Sanchez, "An industry perspective on current QSP trends in drug development," *Journal of Pharmacokinetics and Pharmacodynamics*, Mar. 2024, doi: 10.1007/s10928-024-09905-y.
- [22] K. P. Fourkiotis and A. Tsadiras, "Applying machine learning and statistical forecasting methods for enhancing pharmaceutical sales predictions," *Forecasting*, vol. 6, no. 1, pp. 170–186, Feb. 2024, doi: 10.3390/forecast6010010.

- [23] N. Pillai, A. Abos, D. Teutonico, and P. D. Mavroudis, "Machine learning framework to predict pharmacokinetic profile of small molecule drugs based on chemical structure," *Clinical and Translational Science*, vol. 17, no. 5, May 2024, doi: 10.1111/cts.13824.
- [24] X. Chen, C. He, Y. Chen, and Z. Xie, "Internet of Things (IoT)—blockchain-enabled pharmaceutical supply chain resilience in the post-pandemic era," *Frontiers of Engineering Management*, vol. 10, no. 1, pp. 82–95, Dec. 2022, doi: 10.1007/s42524-022-0233-1.
- [25] S. Perumalsamy and V. Kaliyammurthy, "Blockchain Non-Fungible Token for Effective Drug Traceability System with Optimal Deep Learning on Pharmaceutical Supply Chain Management," *Engineering Technology & Applied Science Research*, vol. 15, no. 1, pp. 19261–19266, Feb. 2025, doi: 10.48084/etasr.9110.
- [26] S. Ouf, "A proposed architecture for pharmaceutical supply chain based semantic blockchain," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 31–42, May 2021, doi: 10.22266/ijies2021.0630.04.
- [27] J. Chen, Y. Xiao, N. Yuan, Y. Wang, J. Zhang, and L. Wang, "The Study on Blockchain Adoption Strategies for Pharmaceutical Regulatory Products under Dual-Channel Competition," *IEEE Access*, p. 1, Jan. 2024, doi: 10.1109/access.2024.3518566.
- [28] R. Mishra, D. Ramesh, N. Mohammad, and B. Mondal, "Blockchain enabled secure pharmaceutical supply chain framework with traceability: an efficient searchable pharmacchain approach," *Cluster Computing*, vol. 27, no. 10, pp. 13621–13641, Jul. 2024, doi: 10.1007/s10586-024-04626-w.
- [29] A. P. and S. Chandrasekaran, "Isogeny Hosmer–Lemeshow Logistic Regression-Based secured information sharing for pharma supply chain," *Electronics*, vol. 11, no. 19, p. 3170, Oct. 2022, doi: 10.3390/electronics11193170.
- [30] M. Aslam, S. Jabbar, Q. Abbas, M. Albathan, A. Hussain, and U. Raza, "Leveraging Ethereum platform for development of efficient tractability system in pharmaceutical supply chain," *Systems*, vol. 11, no. 4, p. 202, Apr. 2023, doi: 10.3390/systems11040202.
- [31] F. Leal et al., "Smart Pharmaceutical Manufacturing: Ensuring End-to-End traceability and data integrity in medicine production," *Big Data Research*, vol. 24, p. 100172, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.bdr.2020.100172.
- [32] J. Shen et al., "Management of drug supply chain information based on 'artificial intelligence + vendor managed inventory' in China: perspective based on a case study," *Frontiers in Pharmacology*, vol. 15, Jul. 2024, doi: 10.3389/fphar.2024.1373642.
- [33] W. A. Zogaan, N. Ajabnoor, and A. A. Salamai, "Leveraging deep learning for risk prediction and resilience in supply chains: insights from critical industries," *Journal of Big Data*, vol. 12, no. 1, Apr. 2025, doi: 10.1186/s40537-025-01143-4.
- [34] J. Xia, H. Li, and Z. He, "The effect of blockchain technology on supply chain collaboration: a case study of Lenovo," *Systems*, vol. 11, no. 6, p. 299, Jun. 2023, doi: 10.3390/systems11060299.
- [35] K. Woyna-Orlewicz and R. Jachowicz, "Pharmaceutical industry before COVID-19," *Farmacja Polska*, vol. 76, no. 5, pp. 269–274, Jul. 2020, doi: 10.32383/farmopol/125555.
- [36] G. M. Hastig and M. S. Sodhi, "Blockchain for Supply Chain Traceability: Business requirements and critical success factors," *Production and Operations Management*, vol. 29, no. 4, pp. 935–954, Dec. 2019, doi: 10.1111/poms.13147.
- [37] O. Srinivas and N. R. Pradhan, "A novel NFT framework for pharmaceutical asset ownership and trading: TokenPharma," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 171418–171433, Jan. 2024, doi: 10.1109/access.2024.3500092.
- [38] I. V.-F. M. Emba, M. Mylrea PhD, C. Y. Zhang PhD, T. C. W. Cissp, and B. T. BSc, "Impact of Blockchain-Digital Twin Technology on Precision Health, pharmaceutical Industry, and Life Sciences CONV2X 2023 Report," *Blockchain in Healthcare Today*, vol. 6, no. 2, Nov. 2023, doi: 10.30953/bhty.v6.281.
- [39] C. Sim, H. Zhang, and N. M. L. Chang, "Improving End-to-End Traceability and Pharma Supply Chain Resilience with Blockchain," *Blockchain in Healthcare Today*, Aug. 2022, doi: 10.30953/bhty.v5.231.
- [40] R. Singh, A. D. Dwivedi, and G. Srivastava, "Internet of things based blockchain for temperature monitoring and counterfeit pharmaceutical prevention," *Sensors*, vol. 20, no. 14, p. 3951, Jul. 2020, doi: 10.3390/s20143951.
- [41] I. Kavasidis, E. Lallas, G. Mountzouris, V. C. Gerogiannis, and A. Karageorgos, "A federated learning framework for enforcing traceability in manufacturing processes," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 57585–57597, Jan. 2023, doi: 10.1109/access.2023.3282316.
- [42] W. Chien et al., "The Last Mile: DSCSA Solution Through Blockchain Technology: Drug Tracking, Tracing, and Verification at the Last Mile of the Pharmaceutical Supply Chain with BRUINchain," *Blockchain in Healthcare Today*, Mar. 2020, doi: 10.30953/bhty.v3.134.
- [43] H. Kayhan, "Ensuring trust in pharmaceutical supply chains by data protection by design approach to blockchains," *Blockchain in Healthcare Today*, Sep. 2022, doi: 10.30953/bhty.v5.232.
- [44] R. Mirfalahdemochali, A. Sherejsharifi, and M. Soufi, "Presenting an innovative sustainable supply chain model based on blockchain in the state of uncertainty in pharmaceutical industry," *International Journal of Engineering*, vol. 38, no. 10, pp. 2347–2356, Jan. 2025, doi: 10.5829/ije.2025.38.10a.11.
- [45] H. Havaeji, T.-M. Dao, and T. Wong, "Supervised Learning by Evolutionary Computation Tuning: An Application to Blockchain-Based Pharmaceutical Supply Chain cost model," *Mathematics*, vol. 11, no. 9, p. 2021, Apr. 2023, doi: 10.3390/math11092021.
- [46] S. Inshutiymana, K. R. Rana, F. A. Abdullahi, and M. M. Aleu, "Artificial intelligence for pharmaceutical quality assurance in Kenya," *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, vol. 7, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1049/cim2.70033.
- [47] E. Fernando, C. Cassandra, Y. Setiawan, A. Hartanto, and J. Farandi, "Blockchain Technology Application as an Add-On Feature in Supply Chain Management of Drug Production process in the pharmaceutical industry," *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 11, no. 7, pp. 79–86, Jul. 2021, doi: 10.46338/ijetae0721_10.
- [48] S. Alharthi, P. R. C. Cerotti, and S. M. Far, "An exploration of the role of blockchain in the sustainability and effectiveness of the pharmaceutical supply chain," *Journal of Supply Chain and Customer Relationship Management*, pp. 1–29, Oct. 2020, doi: 10.5171/2020.562376.
- [49] A. P. and S. C., "Blockchain based Lebesgue interpolated Gaussian secured information sharing for pharma supply chain," *International Journal of Intelligent Networks*, vol. 2, pp. 204–213, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ijin.2021.11.002.
- [50] R. M. Mueas, E. J. M. Rafaile, and J. L. H. Salazar, "Mobile Application with Artificial Intelligence Assistant to Improve the Logistical Process in Pharmaceutical Companies," *International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, vol. 19, no. 04, pp. 166–177, Feb. 2025, doi: 10.3991/ijim.v19i04.52843..
- [51] S. Perumalsamy and V. Kaliyammurthy, "Leveraging Blockchain with Optimal Deep Learning-Based Drug Supply Chain Management for Pharmaceutical Industries," *Computers, Materials & Continua/Computers, Materials & Continua (Print)*, vol. 77, no. 2, pp. 2341–2357, Jan. 2023, doi: 10.32604/cmc.2023.040269.
- [52] M. Liu, Y. Gong, X. Wang, C. Liu, and J. Hu, "DSN-BR-Based Online Inspection Method and application for surface defects of pharmaceutical products in Aluminum-Plastic Blister packages," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 37, no. 1, Aug. 2024, doi: 10.1186/s10033-024-01068-8.
- [53] S. Dash, U. Ghugar, D. Godavarthi, and S. N. Mohanty, "HCSRL: hyperledger composer system for reducing logistics losses in the pharmaceutical product supply chain using a blockchain-based approach," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, Jun. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-61654-7.
- [54] K. C. Bandhu, R. Litoriya, P. Lowanshi, M. Jindal, L. Chouhan, and S. Jain, "Making drug supply chain secure traceable and efficient: a Blockchain and smart contract based implementation," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 82, no. 15, pp. 23541–23568, Nov. 2022, doi: 10.1007/s11042-022-14238-4.
- [55] C. Valencia-Payan, D. Griol, and J. C. Corrales, "Blockchain self-update smart contract for supply chain traceability with data validation," *Logic Journal of IGPL*, May 2024, doi: 10.1093/jigpal/jzae047.
- [56] N. Soy, "AI Predictive Analytics for Verifying Pharmaceutical Authenticity and Combating Drug Counterfeiting," *Deleted Journal*, vol. 32, no. 2, pp. 76–86, Jan. 2025, doi: 10.52783/cana.v32.2252.
- [57] B. K. Rai, S. Srivastava, and S. Arora, "Blockchain-Based traceability of Counterfeited drugs," *International Journal of Reliable and Quality E-Healthcare*, vol. 12, no. 2, pp. 1–12, Feb. 2023, doi: 10.4018/ijrqeh.318129.
- [58] D. Singh and J. K. Chaddah, "A study on application of blockchain technology to control counterfeit drugs, enhance data privacy and improve distribution in online pharmacy," *Asia Pacific Journal of Health Management*, vol. 16, no. 3, pp. 59–66, Sep. 2021, doi: 10.24083/apjhm.v16i3.1013.
- [59] X. Tan, Z. Kang, F. Wei, C. Gao, Z. Wei, and H. Huang, "MB-BC: Drug Traceability System based on Multibranch blockchain structure," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, pp. 1–14, Jul. 2022, doi: 10.1155/2022/5163003.
- [60] K. Zoughalian, J. Marchang, and B. Ghita, "A blockchain secured pharmaceutical distribution system to fight counterfeiting," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 7, p. 4091, Mar. 2022, doi: 10.3390/ijerph19074091.
- [61] Y. Mezquita, B. Podgorelec, A. B. Gil-González, and J. M. Corchado, "Blockchain-Based Supply Chain Systems, interoperability model in a pharmaceutical case study," *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 1962, Feb. 2023, doi: 10.3390/s23041962.
- [62] G. L. Ashkar et al., "Evaluation of decentralized verifiable credentials to authenticate authorized trading partners and verify drug provenance," *Blockchain in Healthcare Today*, Mar. 2021, doi: 10.30953/bhty.v4.168..
- [63] R. Konapure and S. Nawale, "Traceability and Verification to Prevent Counterfeit Drugs: A Secure, Efficient Pharma Supply Chain with IoT-Enabled Blockchain and Smart Contracts," *International Journal of Electronics and Communication Engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 33–43, Jan. 2025, doi: 10.14445/23488549/ijece-v12i1p103.
- [64] M. Uddin, K. Salah, R. Jayaraman, S. Pesic, and S. Ellahham, "Blockchain for drug traceability: Architectures and open challenges," *Health Informatics Journal*, vol. 27, no. 2, p. 146045822110112, Apr. 2021, doi: 10.1177/14604582211011228.
- [65] Y. Sabri, S. Harchi, and N. E. Kamoun, "Managing health supply chain using blockchain technology: state of art challenges and solution," *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems (IJRES)*, vol. 11, no. 3, p. 258, Oct. 2022, doi: 10.11591/ijres.v11.i3.pp258-264.
- [66] V. Bali, P. Soni, T. Khanna, S. Gupta, S. Chauhan, and S. Gupta, "Blockchain application design and algorithms for traceability in pharmaceutical supply chain," *International Journal of Healthcare Information Systems and Informatics*, vol. 16, no. 4, pp. 1–18, Sep. 2021, doi: 10.4018/ijhisi.289460.
- [67] M. Turki, S. Cheikhrouhou, B. Dammak, M. Baklouti, R. Mars, and A. Dhahbi, "NFT-IoT Pharma Chain : IoT Drug traceability system based on Blockchain and Non Fungible Tokens (NFTs)," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 35, no. 2, pp. 527–543, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jksuci.2022.12.016.