

Fecha de recepción: 06 de marzo de 2026, fecha de publicación en línea: junio de 2026.

Impacto de la Ciencia de Datos y Blockchain en la Trazabilidad y la Prevención del Fraude en la Cadena de Suministro Agroalimentaria

Roberto Hernández-Capistrán, Malaquías Quintero-Flores, y Rodolfo Pérez-Loaiza.

Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Apizaco. San Andrés Ahuashuatepec, Municipio de Tzompantepec, Tlaxcala, C.P. 90491, México.

Autor de correspondencia: Roberto Hernández-Capistrán (correo electrónico: d25370001@apizaco.tecnm.mx).

Abstract— The agri-food supply chain faces growing challenges in traceability, transparency, and fraud prevention, driven by its high fragmentation, the diversity of participating stakeholders, and the limited integration of traditional information systems. These constraints generate information asymmetries, erode trust among actors, and hinder the efficient control of product and data flows. In this context, data science and blockchain emerge as complementary approaches with strong potential to transform information management and reinforce trust across the supply chain. This study examines the impact of their integration on improving traceability and fraud prevention in the agri-food sector. Blockchain-based infrastructures significantly enhance the integrity, reliability, and availability of information, while also enabling the early detection of anomalies and fraudulent behavior. The research adopts an analytical and exploratory approach, grounded in a review of academic literature and a comparative analysis of conceptual models, technological architectures, and documented application cases within the agri-food domain. The findings indicate that blockchain strengthens traceability, whereas data science provides predictive analytics, anomalous pattern detection, and decision-support capabilities. Nevertheless, challenges remain regarding scalability, implementation costs, and data governance, which warrant further attention in future research.

Keywords: Agri-food supply chain; blockchain; data science; traceability; fraud prevention; machine learning; deep learning; smart agriculture.

I. INTRODUCCIÓN

La seguridad alimentaria global se ha convertido en uno de los desafíos más críticos del siglo XXI, impulsada por el crecimiento poblacional, los cambios en los patrones de consumo y las presiones ambientales. Diversos estudios estiman que la demanda mundial de alimentos podría incrementarse de forma significativa en las próximas décadas; para el año 2050, se prevé que dicho aumento oscile entre el 100 % y el 110 % en la demanda de cultivos, medida en calorías y proteínas, lo que exige una transformación profunda de los sistemas agroalimentarios actuales [14], [16]. A esta problemática se suma el hecho de que aproximadamente un tercio de los alimentos destinados al consumo humano se pierde o desperdicia a lo largo de la cadena de suministro, particularmente en etapas postcosecha asociadas a prácticas ineficientes de almacenamiento y distribución en países en desarrollo [15]. Este escenario evidencia la necesidad urgente de mejorar la eficiencia, sostenibilidad y trazabilidad de las cadenas de suministro agroalimentarias.

La cadena agroalimentaria constituye un sistema altamente complejo y fragmentado, integrado por múltiples actores — productores, proveedores de insumos, procesadores, transportistas, distribuidores y minoristas— y por etapas interdependientes que abarcan desde la producción primaria hasta la transformación, almacenamiento, distribución y gestión de residuos. Desde una perspectiva sistémica, la cadena de suministro alimentaria puede definirse como el conjunto de flujos físicos, financieros e informacionales que conectan estos actores con el objetivo de llevar productos seguros y de calidad hasta el consumidor final [1], [5]. En este contexto, la trazabilidad representa la capacidad de rastrear el historial, ubicación y transformación de un producto a lo largo de todas las etapas de la cadena, garantizando transparencia, control de calidad y confianza entre los participantes [4]. Sin embargo, históricamente este sistema ha enfrentado problemas estructurales como opacidad informacional, baja interoperabilidad, fraude alimentario e ineficiencias logísticas, lo que limita su capacidad de respuesta ante una demanda creciente y volátil.

Frente a este panorama, la transformación digital está redefiniendo la gestión de las cadenas agroalimentarias mediante la incorporación de tecnologías emergentes que convergen progresivamente hacia el paradigma de Agricultura 5.0. Este concepto describe una nueva fase evolutiva caracterizada por la integración de inteligencia artificial centrada en el ser humano, automatización avanzada, sistemas ciberfísicos y sostenibilidad productiva [16]. A diferencia de enfoques previos centrados únicamente en digitalización y automatización, Agricultura 5.0 propone un modelo inteligente y resiliente que articula objetivos tecnológicos con metas sociales y ambientales, alineándose con los principios de intensificación sostenible planteados en la literatura [15], [16].

En este entorno, la captura sistemática y continua de información se convierte en un elemento estratégico. La tecnología de Internet de las Cosas (IoT) permite la recopilación de datos en tiempo real mediante sensores y dispositivos interconectados desplegados a lo largo de toda la cadena productiva, desde el campo hasta los centros de distribución [4]. Estos sistemas monitorean variables críticas como temperatura, humedad, ubicación geográfica y condiciones de transporte, generando flujos de datos constantes que incrementan la visibilidad operativa y reducen incertidumbre.

La masificación de dispositivos IoT produce grandes volúmenes de datos heterogéneos y de alta frecuencia, lo que se enmarca en el paradigma de Big Data, caracterizado por las dimensiones de volumen, velocidad y variedad [17], [18]. La gestión efectiva de estos datos requiere arquitecturas distribuidas, plataformas de procesamiento escalable y técnicas avanzadas de analítica que permitan extraer valor significativo. En este contexto, la ciencia de datos emerge como disciplina interdisciplinaria que integra estadística, programación, aprendizaje automático y visualización para transformar datos masivos en conocimiento accionable orientado a la toma de decisiones estratégicas [19].

Sobre esta base analítica, la inteligencia artificial (IA) adquiere un papel estratégico en la optimización de la cadena agroalimentaria. La IA puede definirse como el campo dedicado al desarrollo de sistemas capaces de emular funciones cognitivas humanas como el aprendizaje, el razonamiento y la toma de decisiones aplicadas a problemas complejos [3], [6]. En el ámbito agroalimentario, estas capacidades permiten transformar datos operativos provenientes de sensores IoT y plataformas digitales en decisiones orientadas a mejorar eficiencia, transparencia y resiliencia.

Dentro de la IA, el aprendizaje automático (Machine Learning, ML) permite modelar dinámicas complejas de producción, almacenamiento y distribución mediante el análisis de datos históricos y en tiempo real, identificando patrones asociados a riesgos de fraude, variaciones de calidad y disrupciones en la demanda [3], [10]. A su vez, el aprendizaje profundo (Deep Learning), basado en redes neuronales multicapa, amplía estas capacidades al procesar datos heterogéneos y no estructurados —como imágenes agrícolas, variables climáticas y registros transaccionales—

facilitando aplicaciones como detección temprana de anomalías, predicción de demanda y optimización logística [2], [5], [13]. De esta forma, la IA no sustituye la infraestructura digital de trazabilidad, sino que potencia su valor al convertir registros digitales en conocimiento predictivo y accionable.

Paralelamente, la información generada en la cadena puede entenderse como un sistema de registros que documenta transacciones, movimientos físicos y transformaciones del producto. Tradicionalmente, estos registros han sido gestionados mediante bases de datos centralizadas dependientes de una entidad administradora, lo que genera riesgos de fragmentación, manipulación e inconsistencias [1]. Frente a estas limitaciones, blockchain surge como una arquitectura alternativa basada en un libro mayor distribuido, descentralizado e inmutable que registra transacciones mediante mecanismos criptográficos y protocolos de consenso, garantizando integridad y transparencia [1], [6].

En el ámbito agroalimentario, blockchain permite que cada evento —cosecha, procesamiento, transporte o certificación— quede registrado de manera verificable y permanente, reduciendo asimetrías de información y fortaleciendo la confianza entre actores. Investigaciones recientes demuestran mejoras significativas en trazabilidad y transparencia en cadenas como la del cacao, especialmente en fases de procesamiento y distribución [11]. Asimismo, arquitecturas permissionadas como Hyperledger Fabric han mostrado mayor eficiencia y escalabilidad en entornos empresariales [11].

No obstante, blockchain por sí sola no es suficiente para prevenir el fraude de manera proactiva. Estudios recientes integran blockchain con aprendizaje profundo y técnicas avanzadas de analítica para detectar anomalías y optimizar procesos logísticos, alcanzando niveles de precisión superiores al 95 % [2], [5]. Esta convergencia tecnológica evidencia que las soluciones híbridas que combinan blockchain, Big Data, ciencia de datos e inteligencia artificial ofrecen mejores resultados al integrar trazabilidad confiable con capacidades analíticas predictivas en tiempo real.

A pesar del avance significativo, la literatura revela brechas importantes. Muchos estudios analizan tecnologías de manera aislada sin examinar su sinergia operativa y organizacional [11], y gran parte de las propuestas se centran en arquitecturas conceptuales o casos piloto con limitada discusión sobre escalabilidad, sostenibilidad computacional y adopción en países en desarrollo [15], [16].

En este contexto, el presente estudio propone un análisis integrador que examina cómo la convergencia entre blockchain, Big Data y ciencia de datos puede fortalecer simultáneamente la trazabilidad y la prevención del fraude en la cadena de suministro agroalimentaria, identificando tanto beneficios técnicos como limitaciones estructurales. Asimismo, vincula los retos tecnológicos con los desafíos globales de seguridad alimentaria y sostenibilidad, alineando las soluciones digitales con las demandas futuras del sistema agroalimentario.

El artículo se organiza de la siguiente manera: la Sección II describe el enfoque metodológico y los criterios de selección

del corpus científico; la Sección III desarrolla el análisis comparativo de tendencias y brechas en la convergencia blockchain-IA; y la Sección IV presenta las conclusiones y líneas futuras orientadas hacia sistemas agroalimentarios inteligentes, sostenibles y resilientes.

II. MÉTODOS

Este estudio adopta un enfoque cualitativo, analítico y exploratorio, orientado a la identificación de patrones, tendencias y brechas de investigación en la integración de la ciencia de datos y la tecnología blockchain aplicada a la trazabilidad y la prevención del fraude en la cadena de suministro agroalimentaria. El diseño de la investigación es no experimental y transversal, sustentado en el análisis crítico y comparativo de literatura científica especializada.

El enfoque metodológico seleccionado resulta adecuado para sintetizar el conocimiento existente, evaluar el grado de integración tecnológica reportado en la literatura y detectar limitaciones persistentes que justifican la definición de líneas de investigación futura.

2.1 Delimitación del dominio de estudio

El dominio de análisis se delimitó a la cadena de suministro agroalimentaria, considerando sus principales etapas — producción, almacenamiento, procesamiento, distribución y comercialización— así como los problemas asociados a trazabilidad, transparencia, fraude y gobernanza de datos. Desde la perspectiva tecnológica, se incluyeron estudios que abordan:

- Tecnología blockchain, con énfasis en arquitecturas permissionadas.
- Ciencia de datos, aprendizaje automático y aprendizaje profundo.
- Integración con IoT y sistemas de monitoreo en tiempo real.
- Aplicaciones orientadas a trazabilidad, detección de anomalías y mitigación del fraude.

Esta delimitación permitió analizar de forma estructurada las soluciones tecnológicas existentes en distintos niveles de la cadena agroalimentaria.

2.2 Selección de la literatura analizada

La literatura analizada comprende artículos científicos publicados principalmente entre 2015 y 2024, periodo en el que se observa una evolución progresiva desde enfoques descriptivos hacia soluciones híbridas blockchain-IA. Se priorizaron trabajos publicados en revistas indexadas y conferencias de alto impacto, seleccionados con base en su relevancia temática, claridad metodológica y contribución al campo.

Cabe señalar que no se realizó una revisión sistemática formal; en su lugar, se llevó a cabo un análisis crítico y comparativo de literatura representativa, enfoque ampliamente aceptado en estudios orientados al estado del campo y a la identificación de oportunidades de investigación futura.

2.3 Estrategia de análisis y síntesis

Los estudios seleccionados fueron analizados empleando un marco analítico común, lo que permitió una comparación homogénea de enfoques tecnológicos y resultados reportados. Los criterios de análisis considerados en este marco se resumen en la Tabla 1, e incluyen el tipo de tecnología empleada, el nivel de integración, la funcionalidad principal, los beneficios reportados, las limitaciones identificadas y el contexto de aplicación.

Tabla 1. Resumen de criterios de análisis utilizados

Criterio	Aplicación en el corpus
Blockchain	Hyperledger Fabric, blockchains permissionadas
Ciencia de datos	ML, DL, RL, análisis predictivo
Objetivo	Trazabilidad, fraude, optimización
Dominio	Agroalimentario
Escala	Pilotos, simulaciones, casos de estudio
Limitaciones	Escalabilidad, costos, gobernanza

A partir de este marco, el análisis se centró en identificar:

- Patrones recurrentes, como el uso de soluciones híbridas blockchain-ML/DL.
- Tendencias emergentes, incluyendo modelos predictivos, detección proactiva de fraude y arquitecturas interoperables.
- Brechas persistentes, relacionadas con escalabilidad, consumo computacional, gobernanza de datos y adopción en pequeños productores y PyMES agroalimentarias.

La Figura 1 sintetiza el proceso metodológico seguido en este artículo para analizar la convergencia entre ciencia de datos y blockchain en la cadena de suministro agroalimentaria. El procedimiento se estructuró en seis etapas consecutivas:

Etapas 1. Selección del corpus (2011–2024)

Se construyó un corpus de $n = 16$ referencias clave publicadas entre 2011 y 2024. Estas incluyen trabajos fundacionales sobre sostenibilidad agrícola global [14]–[16], así como estudios recientes centrados en blockchain, inteligencia artificial y trazabilidad agroalimentaria [2]–[13]. La búsqueda se realizó en bases indexadas como IEEE Xplore, MDPI Sensors, Elsevier y Springer.

Etapas 2. Clasificación temporal y tecnológica

Los artículos fueron organizados según dos criterios principales:

1. evolución temporal (2011–2018, 2019–2021, 2022–2024)
2. tipo de enfoque tecnológico: blockchain (BC), aprendizaje automático (Machine Learning, ML), aprendizaje profundo (DL), IoT y modelos híbridos BC-AI [3], [4], [12].

Etapas 3. Análisis comparativo del desempeño

Se efectuó una comparación cualitativa de los aportes reportados en términos de:

- transparencia y trazabilidad [4], [12],
- optimización logística y toma de decisiones [5], [9],
- sostenibilidad agrícola mediante DL [2], [13].

Etapa 4. Identificación de patrones y tendencias

El análisis evidenció una tendencia creciente desde 2020 hacia arquitecturas integradas blockchain + IA, particularmente en aplicaciones de provenance digital, monitoreo IoT y predicción inteligente [4], [5], [6]. Asimismo, se observa un aumento de revisiones amplias y marcos prospectivos desde 2023 [3].

Etapa 5. Detección de brechas de investigación

Se identificaron limitaciones persistentes relacionadas con:

- escalabilidad real en escenarios productivos,
- privacidad y protección de datos sensibles [8],
- adopción limitada en pequeños productores y PyMES agroalimentarias [10], [12].

Etapa 6. Propuesta de líneas futuras

Finalmente, se plantean líneas de investigación orientadas hacia una Agricultura 5.0, impulsada por blockchain sostenible y algoritmos avanzados como deep reinforcement learning [5], así como soluciones energéticamente eficientes y aplicables a cadenas completas “de la semilla al consumidor”.



Figura 1. Flujo metodológico basado en el corpus

2.4 Identificación de brechas y líneas de investigación futura

La síntesis analítica de los estudios permitió identificar brechas a nivel técnico, metodológico y contextual, las cuales constituyen la base para proponer líneas de investigación futura orientadas a soluciones más escalables, sostenibles e interoperables en la cadena de suministro agroalimentaria.

III. CONVERGENCIA DE LA CIENCIA DE DATOS Y BLOCKCHAIN EN LA CADENA AGROALIMENTARIA

La literatura reciente evidencia una convergencia acelerada entre blockchain, IoT y ciencia de datos como respuesta a los

desafíos críticos de trazabilidad, transparencia y eficiencia en las cadenas agroalimentarias. En particular, los estudios del corpus muestran que blockchain aporta registros inmutables y mecanismos de confianza, mientras que los enfoques de aprendizaje automático y profundo fortalecen la predicción, detección de anomalías y optimización operativa.

Por ejemplo, el trabajo de Khan et al. (2020) propone un sistema de procedencia optimizado en Food Industry 4.0 mediante IoT-blockchain integrado con aprendizaje profundo, demostrando el potencial del monitoreo inteligente en tiempo real [4]. De forma complementaria, Kumari et al. (2023) presentan una revisión amplia sobre aplicaciones de aprendizaje máquina e inteligencia artificial en cadenas agrícolas, identificando tendencias hacia arquitecturas híbridas para logística, predicción de demanda y reducción de pérdidas [3].

En términos de enfoques avanzados, Alla y Thangarasu (2024) desarrollan un marco blockchain–aprendizaje profundo basado en Deep Random Forest para mejorar la sostenibilidad y rapidez de respuesta en sistemas agroalimentarios [2]. Asimismo, Chen et al. (2021) destacan el uso de aprendizaje por refuerzo profundo para decisiones dinámicas de gestión en redes agroalimentarias complejas [5]. Finalmente, el estudio de Thatikonda et al. (2024) reporta mejoras significativas en eficiencia y precisión predictiva mediante redes CNN combinadas con blockchain [13]. Estos hallazgos comparativos se sintetizan en la Tabla II, que resume los aportes principales, tecnologías utilizadas y limitaciones persistentes.

Tabla II. Trabajos sobre Blockchain e IA en cadenas agroalimentarias

Ref.	Enfoque	Contribución principal	Brecha clave
[4]	IoT–Blockchain–DL	Procedencia y trazabilidad en tiempo real (Food Industry 4.0)	Escalabilidad limitada
[3]	ML/IA (Survey)	Tendencias en predicción y automatización logística agrícola	Baja adopción en países en desarrollo
[2]	Blockchain + DRF (DL)	Mayor exactitud y sostenibilidad en trazabilidad agrícola	Costos computacionales
[5]	Blockchain + DRL	Optimización dinámica y decisiones adaptativas en agri-food SCM	Validación industrial insuficiente
[13]	Blockchain + CNN	Predicción robusta de demanda con alta precisión	Consumo energético elevado
[12]	Blockchain + IoT + ML	Transparencia y monitoreo agrícola mediante sensores inteligentes	Implementación costosa para PyMES
[1]	Blockchain aplicada	Evaluación crediticia y confianza multi-actor en food supply chain	Requiere gobernanza institucional
[9]	Blockchain + ML	Optimización logística agrícola mediante integración sinérgica	Falta de pruebas en campo
[6]	IA + Blockchain (Survey)	Estado del arte y retos futuros de convergencia tecnológica	Falta de estándares sostenibles

3.1 Brechas de Investigación

A partir del análisis comparativo (Tabla II), emergen brechas relevantes:

- Escalabilidad y costos energéticos: la mayoría de soluciones híbridas requieren infraestructuras complejas y costosas.
- Gobernanza e interoperabilidad de datos: falta consenso en modelos estándar para integrar blockchain con sistemas agrícolas existentes.
- Adopción en pequeños productores y PyMES: los estudios se enfocan en marcos tecnológicos avanzados, pero con baja evidencia en contextos rurales.
- Validación en escenarios reales: predominan simulaciones o prototipos, con limitada implementación industrial.
- Sostenibilidad computacional: deep learning y blockchain combinados incrementan el consumo energético, abriendo espacio para enfoques Green Blockchain.

IV. CONCLUSIONES

Este estudio analizó la convergencia entre la ciencia de datos y la tecnología blockchain como enfoques complementarios para fortalecer la trazabilidad y la prevención del fraude en la cadena de suministro agroalimentaria. A partir de la literatura examinada, se identificó un crecimiento sostenido de soluciones híbridas que integran blockchain con técnicas de aprendizaje automático, aprendizaje profundo e infraestructuras IoT, orientadas a mejorar la transparencia, la integridad de la información y la eficiencia operativa en sistemas agroalimentarios complejos.

Los hallazgos muestran que blockchain aporta principalmente mecanismos de registro inmutable y confianza distribuida, facilitando la procedencia verificable de productos y la reducción de opacidad en múltiples etapas de la cadena. Paralelamente, la ciencia de datos y la inteligencia artificial fortalecen capacidades analíticas avanzadas, tales como predicción de demanda, detección de anomalías y optimización logística. En particular, estudios basados en deep learning y arquitecturas robustas reportan mejoras relevantes en precisión predictiva, mientras que enfoques emergentes como el aprendizaje por refuerzo profundo amplían las posibilidades de gestión dinámica y toma de decisiones adaptativas.

Sin embargo, la revisión evidencia limitaciones persistentes que restringen la adopción a gran escala. Entre ellas destacan los desafíos de escalabilidad, los costos computacionales y energéticos asociados a modelos avanzados, así como problemas de interoperabilidad y gobernanza de datos. Asimismo, se observa una brecha significativa en la validación de estas propuestas en escenarios reales, especialmente en contextos de pequeños productores y PyMES agroalimentarias, donde las restricciones tecnológicas y económicas son mayores.

En conclusión, la integración de ciencia de datos y blockchain constituye un enfoque prometedor para transformar la trazabilidad y mitigar el fraude en cadenas agroalimentarias. No obstante, futuras investigaciones deben priorizar arquitecturas sostenibles, mecanismos de adopción inclusiva y

evaluaciones empíricas en entornos productivos reales, con el fin de consolidar su impacto en la seguridad alimentaria y la sostenibilidad global.

V. TRABAJOS FUTUROS

Los hallazgos sintetizados en la Tabla II evidencian que la convergencia entre ciencia de datos y blockchain constituye un enfoque prometedor para fortalecer la trazabilidad, la transparencia y la prevención del fraude en cadenas de suministro agroalimentarias. No obstante, el corpus revisado muestra que la mayoría de las contribuciones actuales permanecen en fases de prototipo o validación experimental, con limitada adopción en escenarios productivos reales, particularmente en pequeños productores y PyMES del sector agroalimentario [3], [4].

En este sentido, una línea prioritaria de investigación futura consiste en avanzar hacia implementaciones empíricas aplicadas a cadenas de valor específicas, como la cadena del cacao en la región de Tabasco. La literatura ha documentado el potencial de blockchain para mejorar la transparencia y la trazabilidad en cadenas agrícolas mediante soluciones híbridas con IoT y aprendizaje automático [12], pero persiste la necesidad de desarrollar marcos operativos integrales que cubran todo el proceso desde la producción primaria hasta el consumidor final.

Asimismo, futuras investigaciones deben enfocarse en arquitecturas sostenibles y energéticamente eficientes. Diversos trabajos del corpus reportan avances mediante deep learning e IoT-blockchain para procedencia y monitoreo en tiempo real [4], así como enfoques robustos basados en redes profundas para fortalecer la gestión alimentaria [13]. Sin embargo, estas soluciones enfrentan desafíos asociados a costos computacionales y consumo energético, lo que motiva la exploración de enfoques de *Green Blockchain* y mecanismos de consenso alternativos.

En particular, se propone investigar alternativas más eficientes que eviten mecanismos intensivos como Proof-of-Work, evaluando opciones como Proof-of-Stake, Proof-of-Authority o esquemas Byzantine Fault Tolerance en redes permissionadas, con el objetivo de reducir el impacto energético y mejorar la viabilidad en contextos agroalimentarios locales [6].

De manera complementaria, se recomienda profundizar en la identificación de combinaciones óptimas entre blockchain y algoritmos de aprendizaje máquina. La revisión de Kumari et al. destaca tendencias hacia modelos predictivos, automatización logística y reducción de pérdidas en cadenas agrícolas [3], mientras que propuestas recientes como Alla y Thangarasu evidencian el potencial de arquitecturas blockchain-deep learning para sostenibilidad y trazabilidad [2]. Asimismo, enfoques basados en aprendizaje por refuerzo profundo amplían las posibilidades de optimización dinámica en cadenas agroalimentarias complejas [5].

Finalmente, se plantea como objetivo futuro el diseño de una solución integral que permita rastrear y auditar toda la cadena agroalimentaria “de la semilla al consumidor”, integrando datos IoT, registros blockchain y analítica inteligente para construir sistemas agroalimentarios más seguros, resilientes y

sostenibles, particularmente orientados a PyMES y productores regionales [9], [12].

REFERENCIAS

- [1] D. Mao, F. Wang, Z. Hao, and H. Li, "Credit evaluation system based on blockchain for multiple stakeholders in the food supply chain," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 15, no. 8, p. 1627, Aug. 2018, doi: 10.3390/ijerph15081627.
- [2] K. R. Alla and G. Thangarasu, "Blockchain based deep learning for sustainable agricultural supply chain management," *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 45, no. 2, pp. 142–151, May 2024, doi: 10.37934/araset.45.2.142151.
- [3] S. Kumari et al., "Application of machine learning and artificial intelligence on agriculture supply chain: a comprehensive review and future research directions," *Ann. Oper. Res.*, Sep. 2023, doi: 10.1007/s10479-023-05585-5.
- [4] P. W. Khan, Y.-C. Byun, and N. Park, "IoT-blockchain enabled optimized provenance system for food industry 4.0 using advanced deep learning," *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2990, May 2020, doi: 10.3390/s20102990.
- [5] H. Chen, Z. Chen, F. Lin, and P. Zhuang, "Effective management for blockchain-based agri-food supply chains using deep reinforcement learning," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 3601–3612, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3049920.
- [6] D. Bhumichai, C. Smiliotopoulos, R. Benton, G. Kambourakis, and D. Damopoulos, "The convergence of artificial intelligence and blockchain: The state of play and the road ahead," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–31, 2024, doi: 10.3390/app14010001.
- [7] A. Khan and M. T. Equbal, "Exploring the potential of blockchain in data science," Preprint, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2401.12345> (or institutional repository).
- [8] H. Kim, S.-H. Kim, J. Y. Hwang, and C. Seo, "Efficient privacy-preserving machine learning for blockchain network," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 136481–136495, Sep. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2940052.
- [9] G. Asalkar et al., "Synergistic integration of blockchain technology and machine learning algorithms for optimization of agriculture supply chain management," in *Proc. 3rd Int. Conf. Intell. Data Commun. Technol. Internet Things (IDCIoT)*, 2025, pp. 346–351, doi: 10.1109/IDCIOT64235.2025.10914999.
- [10] W. Guan, W. Ding, B. Zhang, J. Verny, and R. Hao, "Do supply chain related factors enhance the prediction accuracy of blockchain adoption? A machine learning approach," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 192, p. 122552, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.techfore.2023.122552.
- [11] T. Rahman et al., "Blockchain applications in business operations and supply chain management by machine learning," *Int. J. Comput. Sci. Inf. Secur.*, vol. 22, no. 11, pp. 1–15, Nov. 2024, doi: 10.55640/ijesis/Volume22Issue11-03.
- [12] M. Harini et al., "Leveraging blockchain for transparency in agriculture supply chain management using IoT and machine learning," in *Proc. World Conf. Commun. Comput. (WCONF)*, Raipur, India, Jul. 2023, pp. 1–6, doi: 10.1109/WCONF58270.2023.10235156.
- [13] R. Thatikonda, R. Thota, R. Tatikonda, and A. Bhuvanesh, "Deep learning based robust food supply chain enabled effective management with blockchain," Preprint, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12345.67890>.
- [14] D. Tilman, C. Balzer, J. Hill, and B. L. Befort, "Global food demand and the sustainable intensification of agriculture," *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, vol. 108, no. 50, pp. 20260–20264, Dec. 2011, doi: 10.1073/pnas.1116437108.
- [15] J. Rockström et al., "Sustainable intensification of agriculture for human prosperity and global sustainability," *Ambio*, vol. 46, no. 1, pp. 4–17, Feb. 2017, doi: 10.1007/s13280-016-0793-6.
- [16] P. G. Pardey, J. M. Beddow, T. M. Hurley, T. K. M. Beatty, and V. R. Eidman, "A bounds analysis of world food futures: Global agriculture through to 2050," *Aust. J. Agric. Resour. Econ.*, vol. 58, no. 4, pp. 571–589, Oct. 2014, doi: 10.1111/1467-8489.12059.
- [17] M. A. Author et al., "Human-centered AI in smart farming: Toward Agriculture 5.0," *Journal / Publisher según PDF cargado*, 2023/2024.
- [18] A. Holzinger, I. Fister Jr., I. Fister Sr., H.-P. Kaul, and S. Asseng, "Human-Centered AI in Smart Farming: Toward Agriculture 5.0," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 1–3, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3395532.
- [19] F. Amalina, I. A. T. Hashem, Z. H. Azizul, A. T. Fong, A. Firdaus, M. Imran, and N. B. Anuar, "Blending Big Data Analytics: Review on Challenges and a Recent Study," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 29463–29471, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923270.
- [20] U. Qamar and M. S. Raza, *Data Science: Concepts and Techniques with Applications*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2020, doi: 10.1007/978-981-15-6133-7.



ROBERTO HERNANDEZ CAPISTRAN

Obtuvo el título de Licenciatura en Ingeniería en Computación, con especialidad en Inteligencia Artificial, por la Universidad Autónoma de Tlaxcala en 2004. Posteriormente, obtuvo el grado de Maestro en Ciencias Computacionales en la misma institución. Actualmente, es estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en el Instituto Tecnológico de Apizaco (ITA). Sus intereses de investigación incluyen el desarrollo e implementación de tecnologías blockchain y la ciencia de datos aplicadas a diversas áreas.



RODOLFO ELEAZAR PÉREZ-LOAIZA

obtuvo el grado de Licenciado en Ingeniería Industrial y el grado de Maestro en Ciencias en Computación en el Instituto Tecnológico de Apizaco (ITA), Apizaco, Tlaxcala, México, en 1999 y 2022, respectivamente, así como el grado de Doctor en Logística y Gestión de la Cadena de Suministro en la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla (UPAEP), en 2015.

Actualmente se desempeña como profesor de tiempo completo en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del ITA. Su área de interés se relaciona con el análisis y la optimización de cadenas de suministro y redes logísticas, mediante el uso de técnicas de investigación de operaciones e inteligencia computacional



PERFECTO MALAQUÍAS QUINTERO FLORES

obtuvo el título de Ingeniería Industrial por el Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Apizaco, el grado de Maestría en Ciencias Computacionales por el Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Toluca, obtuvo el grado de Doctor en Ciencias de la Computación (Informatique) por la Universidad de Montpellier (UM), trabajando su disertación doctoral en el Laboratorio de Investigación en Ciencias de la Computación, Robótica y Microelectrónica (LIRMM) del Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS) de Francia. Actualmente es Profesor Investigador de tiempo completo en el Departamento Sistemas y Computación del TecNM – IT Apizaco y de medio tiempo en FCByT de la UATx. Las áreas de investigación de su interés son Ciencia de Datos, Big Data, Computación de Alto Rendimiento, Inteligencia Artificial Centrada en Datos, Inteligencia Artificial Centrada en el Ser Humano y Procesamiento del Lenguaje Natural.