

TRAZABILIDAD INTELIGENTE DE ALIMENTOS MEDIANTE BLOCKCHAIN Y SENSORES IOT: REVISIÓN SISTEMÁTICA DE SU APLICACIÓN EN CADENAS DE SUMINISTRO AGROINDUSTRIALES

SMART FOOD TRACEABILITY USING BLOCKCHAIN AND IoT SENSORS: A SYSTEMATIC REVIEW OF ITS APPLICATION IN AGROINDUSTRIAL SUPPLY CHAINS

Evelyn Alejandra Vargas Peralvo¹, Jorge Andrés Ricaurte Domínguez²

{ea.vargasp@uea.edu.ec¹, jorge.ricaurte@unach.edu.ec²}

Fecha de recepción: 07/08/2025 / Fecha de aceptación: 19/08/2025 / Fecha de publicación: 20/08/2025

RESUMEN: La seguridad alimentaria y la confianza del consumidor son clave para el comercio internacional, pero las cadenas de suministro tradicionales presentan vulnerabilidades. El uso combinado de blockchain y el Internet de las Cosas (IoT) ofrece una solución eficaz, garantizando trazabilidad y monitoreo continuo de productos, lo que previene fraudes y asegura su calidad. Este estudio sistemático de la literatura, que se ha adherido a las directrices PRISMA, se dedica a evaluar la madurez actual de la incorporación conjunta de blockchain e IoT en la trazabilidad alimentaria. Mediante búsquedas sistemáticas en Scopus y Web of Science se localizaron 65 investigaciones pertinentes; de éstas, 30 fueron elegidas para un examen detallado. Los hallazgos presentados evidencian que la integración sincronizada de las tecnologías estudiadas, lejos de representar únicamente la acumulación de componentes aislados, genera un registro de producto que es simultáneamente verificable y accesible, lo que, a su vez, refuerza la transparencia y la seguridad alimentaria. A esta contribución se suman incrementos medibles en eficiencia operativa, reducciones voluminosas en costos derivados de desperdicios y un notable afianzamiento de la confianza del consumidor. Sin embargo, las evidencias acumuladas revelan la existencia de barreras que no pueden ser ignoradas: la escalabilidad de las arquitecturas implementadas, la interoperabilidad entre entornos heterogéneos, la carga de inversión inicial necesaria y la dependencia de infraestructuras tecnológicas sostenibles a largo plazo. A partir de lo anterior, se sostiene que la trazabilidad alimentaria inteligente, sustentada en tecnologías de contabilidad distribuida y de Internet de las Cosas, representa un avance ineludible para la administración moderna de las cadenas de suministro alimentario, al tiempo que admite la restricción del fraude, el refuerzo de la seguridad alimentaria y la contribución al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

¹Universidad Estatal Amazónica, Puyo <https://orcid.org/0000-0002-7367-9347>.

²Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba <https://orcid.org/0009-0007-7516-8843>.

Palabras clave: Trazabilidad de alimentos, blockchain, internet de las cosas (IoT), cadenas agroindustriales

ABSTRACT: Food security and consumer trust are key to international trade, but traditional supply chains present vulnerabilities. The combined use of blockchain and the Internet of Things (IoT) offers an effective solution, ensuring traceability and continuous product monitoring, which prevents fraud and ensures quality. This systematic literature review, adhering to PRISMA guidelines, aims to assess the current maturity of the joint integration of blockchain and IoT in food traceability. Through systematic searches in Scopus and Web of Science, 65 relevant studies were identified, of which 30 were selected for detailed examination. The findings presented show that the synchronized integration of the studied technologies, far from merely representing the accumulation of isolated components, generates a product record that is both verifiable and accessible, which in turn enhances transparency and food security. This contribution is further supported by measurable increases in operational efficiency, substantial reductions in waste-related costs, and a notable strengthening of consumer trust. However, the accumulated evidence reveals the existence of barriers that cannot be ignored: the scalability of implemented architectures, interoperability between heterogeneous environments, the required initial investment burden, and the dependence on long-term sustainable technological infrastructures. Based on this, it is argued that smart food traceability, supported by distributed ledger technologies and the Internet of Things, represents an unavoidable advance for modern supply chain management, while helping to limit fraud, strengthen food security, and contribute to the achievement of the Sustainable Development Goals.

Keywords: Food traceability, blockchain, Internet of Things (IoT), agro-industrial chains

INTRODUCCIÓN

La seguridad y la calidad alimentaria representan retos duraderos en un contexto global interconectado. Las cadenas de suministro agroindustriales contemporáneas, que unen a productores de distintas latitudes con consumidores dispersos en el planeta, muestran una complejidad inherente y, con frecuencia, escasa transparencia (1), (2). Dicha falta de claridad alimenta el fraude, la contaminación y la propagación de enfermedades transmitidas por alimentos, infraestructuras que comprometen la salud pública, generan enormes pérdidas monetarias y socavan la confianza de los consumidores en el mercado (3), (4).

La trazabilidad cuyo significado se consigna en la norma ISO 22005:2007 como la habilidad de seguir el recorrido de un alimento a lo largo de todas las etapas de la cadena se rige como la estrategia esencial para contener tales peligros. No obstante, los esquemas de trazabilidad vigentes, que se apoyan en registros manuales o en bases de datos centralizadas, adolecen de lentitud y son susceptibles de manipulación(5), (6). El recorrido para identificar el foco de un brote de contaminación puede prolongarse por semanas, un retraso que complica la gestión de la crisis y limita las posibilidades de una respuesta oportuna (7).

En este marco, la industria ha dirigido su atención hacia la elaboración de plataformas tecnológicas de vanguardia. La sinergia entre la cadena de bloques y el Internet de las cosas se perfila como una de las herramientas más promisorias para reconfigurar la trazabilidad alimentaria, al permitir el registro descentralizado y la impresión de datos en tiempo real (8), (9). La primera, inicialmente asociada con las criptomonedas, opera como un registro distribuido que resulta análogo a un libro mayor, donde cada operación, como el movimiento de un producto desde el campo hasta la línea de envasado, se inserta en un bloque cuya modificación exige el acuerdo de todos los nodos involucrados.

Tal mecanismo produce un narrativo ininterrumpido acerca del objeto logisticado, el cual exhibe, a un tiempo, garantías de seguridad, niveles de transparencia y facultades de auditoría para cada uno de los nodos de la red distributiva (10), (11). La inalterabilidad que distingue esta arquitectura constituye el obstáculo que frena las sustituciones indeseadas y certifica la autenticidad de la información. El Internet de las Cosas, a su vez, constituye el vínculo que interconecta el dominio material y el plano digital.

Mediante sensores IoT, tales como termómetros, registradores de humedad y equipos GPS, los parámetros críticos de los productos son muestreados de modo autónomo y en continuo durante toda la cadena de frío(12), (13). Un caso ilustrativo se produce en un remolque refrigerado, donde un termómetro digital transmite la temperatura a intervalos regulares; en caso de que el valor momentáneo supere un valor crítico estipulado, un contrato inteligente en la Blockchain se activa y registra el incidente como una discrepancia en el historial de transporte.

En este marco, la automatización reduce la probabilidad de errores inducidos por el operario durante el registro de datos y proporciona un resguardo de la información que es simultáneamente ininterrumpido y susceptible de verificación auditada (14), (15). La intersección entre el Internet de las Cosas y las infraestructuras de cadena de bloques concepto que se designa como trazabilidad inteligente integra al almacenamiento la facultad de validar la datos de manera autónoma y en tiempo real, lo que, a su vez, refuerza la seguridad total de las transacciones y eleva el nivel de confianza del consumidor(16), (17).

La motivación principal que orienta este estudio es la necesidad apremiante de articular y ampliar el corpus de conocimiento acerca de esta tecnología disruptiva. Aunque el interés de la industria y algunos experimentos de campo como el seguimiento de la carne de cerdo por parte de Walmart en China (18), se han multiplicado, la literatura académica sigue presentando un carácter fragmentario. Con este telón de fondo, el presente trabajo se formula como un esfuerzo por subsanar esta laguna mediante una revisión sistemática que analice de manera rigurosa las ventajas, los desafíos y el estado actual de la adopción de la tecnología.

Resulta, por ende, ineludible avanzar más allá de la mera enunciación de los beneficios conceptuales y someter a escrutinio las barreras concretas que limitan una implantación generalizada, entre las que se cuentan los altos costos iniciales y la falta de interoperabilidad entre arquitecturas informáticas heterogéneas (19), (20).

El eje axial de esta investigación analiza el potencial que la convergencia sinérgica entre las tecnologías de registro distribuido y las redes de sensores de dispositivos interconectados presenta para solventar las limitaciones estructurales de los sistemas de trazabilidad tradicional en el sector agroindustrial. El propósito consiste en discernir tanto los obstáculos como las oportunidades decisivas que surgen al integrar ambas tecnologías en las cadenas de suministro agroalimentario.

Tal propósito orienta la ejecución de una revisión sistemática destinada a cuantificar el impacto que la interacción concatenada de ambas plataformas ejerce sobre la trazabilidad de los productos alimentarios; a gradar los beneficios que emergen de dicha interdependencia; a cartografiar los obstáculos que persisten y a delinear las futuras avenidas de investigación. El propósito final es fomentar una industria alimentaria capaz de articular, de modo concurrente, una mayor seguridad, transparencia y eficiencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo implementa una revisión sistemática de la literatura, procedimiento científico que, mediante etapas definidas y susceptibles de repetición, posibilita la localización, criba y condensación imparcial de la evidencia acumulada en torno a un fenómeno previamente sectorizado. Con el fin de garantizar tanto la transparencia como la robustez metodológica, se han respetado las recomendaciones prescritas por la declaración PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Este esquema operativo se ejecutó en una serie de cuatro etapas sucesivas: Identificación, Cribado, Elegibilidad e Inclusión. A continuación, se expone el procedimiento seguido en cada una de dichas etapas.

Antes de iniciar la recolección de datos, se planteó con claridad la pregunta de investigación que guiaría cada etapa de la indagación: Cómo la interacción entre la tecnología Blockchain y los sensores de Internet de las Cosas refuerza la trazabilidad, la seguridad y la eficiencia en las cadenas de suministro agroindustriales, y qué retos y posibilidades predominan en la carrera hacia su adopción generalizada. Con esta pregunta como eje, se estructuraron los objetivos específicos del estudio, los cuales orientaron la curaduría y selección de las fuentes documentales que, de forma sistemática, alimentaron la posterior argumentación.

Estrategia de búsqueda y fuentes de datos

La recolección bibliográfica se llevó a cabo de forma sistemática en repositorios académicos y plataformas científicas reconocidas: Scopus, Web of Science, ScienceDirect e IEEE Xplore. Para asegurar la vigencia de la evidencia, se limitó a documentos publicados entre 2018 y 2024, período que coincide con la aceleración de los avances en Blockchain e IoT.

Se diseñó un string de búsqueda que articulaba conceptos clave y conectores booleanos, de manera que se logró una cobertura extensa y, al mismo tiempo, un filtrado riguroso que excluyó la producción no pertinente.

Tabla 1. Estrategia de Búsqueda de la Literatura.

Base de datos	Cadena de búsqueda	Período
Scopus	("blockchain" AND "food traceability") OR ("IoT" AND "food supply chain")	2018-2024
Web of Science	("smart traceability" AND "agro-industry") OR ("distributed ledger" AND "food safety")	2018-2024
ScienceDirect	("IoT sensors" AND "agrifood supply chain") OR ("blockchain" AND "food supply chain")	2018-2024
IEEE Xplore	("blockchain" AND "food traceability")	2018-2024

Análisis: La Tabla 1 condensa la estrategia de búsqueda adoptada en la presente revisión, elaborada en torno a cuatro bases de datos científicas de primer nivel (Scopus, Web of Science, ScienceDirect e IEEE Xplore) y abarcando el intervalo 2018–2024 para incorporar investigaciones recientes y pertinentes. Las cadenas de búsqueda combinan vocablos fundamentales como “blockchain”, “IoT” y “food traceability” a través de operadores booleanos, de modo que se recupera la literatura indexada que explora con claridad la articulación de estas tecnologías en la trazabilidad y gobernanza de cadenas agroalimentarias. Tal metodología, concordante con el prisma PRISMA, garantiza una búsqueda sistemática, reproducible y dirigida a resultados de significancia.

Criterios de selección (cribado y elegibilidad)

La gestión y filtrado de los resultados se llevó a cabo en dos etapas sucesivas y definidas.

Tabla 2. Criterios de Inclusión y Exclusión.

Fase PRISMA	Proceso	Criterios
Cribado	Eliminación de duplicados. Revisión de títulos y resúmenes.	Inclusión: Artículos sobre trazabilidad en cadenas agroindustriales, modelos, prototipos o revisiones Exclusión: Los textos considerados para el presente análisis no incluyen contribuciones de carácter op-ed, piezas editoriales, resúmenes que no acompañen al cuerpo completo del trabajo o cualquier segmento que carezca de desarrollo argumentativo autónomo.
Elegibilidad	Lectura completa del texto. Comprobación de relevancia y calidad.	Inclusión: Se consideraron aquellos estudios que presentan evidencia empírica rigurosa acerca de los beneficios económicos, sociales y ambientales de la trazabilidad inteligente, así como aquellos que discuten de manera sistemática los desafíos técnicos y organizativos que enfrentan las cadenas agroalimentarias al implementar tales sistemas. Exclusión: Se descartaron aquellos trabajos que, aun si mencionan la trazabilidad, carecen de un análisis específico dirigido a las particularidades del sector agroalimentario, limitándose a un marco general de tecnologías de información.

Análisis: La Tabla 2 sistematiza los criterios de inclusión y exclusión implementados según las etapas de cribado y elegibilidad del modelo PRISMA, asegurando, de este modo, la selección exhaustiva de la bibliografía pertinente. Durante la primera fase de cribado, los registros

duplicados fueron eliminados y, a continuación, se evaluaron los títulos y resúmenes, admitiéndose únicamente los estudios que evaluaron la trazabilidad dentro de las cadenas agroindustriales, de modo que avanzaron como modelos, prototipos y revisiones sistemáticas, mientras que se desestimaron artículos de opinión, editoriales y documentos carentes de texto completo.

En la etapa subsiguiente de elegibilidad, se realizó una revisión exhaustiva de los textos, con el objetivo de verificar su relevancia y calidad científica, e incorporando exclusivamente aquellos que proporcionaban datos fiables en torno a los beneficios y las limitaciones de la trazabilidad inteligente y excluyendo las investigaciones que ofrecían una visión general sin una aplicación específica al ámbito agroalimentario. Este procedimiento asegura que el análisis final se construya sobre la evidencia científica más pertinente y sólida.

Obtención de datos y análisis

Finalizada la fase de selección, la recogida de datos se realizó de forma estructurada, registrando de modo sistemático la información relevante de cada publicación retenida. Los hallazgos fueron reorganizados en categorías emergentes, lo cual permitió la detección de patrones y de tendencias acumulativas en el corpus literario examinado.

Tabla 3. Extracción de datos y análisis temático

Categoría	Datos extraídos por artículo	Finalidad del análisis
Información General	Autores, año, tipo de estudio	Esta indagación insertada en la evaluación sistemática de tecnologías emergentes orientadas a redes de sensores distribuidos en configuraciones industriales ha encontrado, empero, obstáculos relevantes.
Beneficios	Transparencia, seguridad, eficiencia, confianza	Entre las ventajas específicas adoptadas en este trabajo, se destacan la reducción de costos de infraestructura, la mejora en la latencia de transmisión de datos y el incremento de la energía disponible para nodos de larga duración.
Desafíos	Costo, escalabilidad, interoperabilidad, privacidad	Sin embargo, se identificaron barreras importantes para su implementación y adopción, que comprenden la heterogeneidad de normas, las limitaciones en entre ellos se destaca el limitado grado de interoperabilidad de los dispositivos y la carencia de protocolos estandarizados que rijan la gestión de la seguridad.
Tecnologías	Plataformas Blockchain, tipos de sensores IoT	Complementariamente, se ha considerado la arquitectura técnico-operativa que resulta necesaria, poniendo énfasis en la segmentación de los dominios de gestión y en la inclusión de módulos de canalización de energía a lo largo de la cadena de suministro de los nodos.
Conclusiones	Recomendaciones y futuras líneas de investigación	Por último, las simulaciones de Monte Carlo realizadas proyectan una estabilización de costos de implementación hacia 2030, sugiriendo un posible desbordamiento de la penetración de tales tecnologías en la red de sensores industriales.

Análisis: Los datos recuperados se procesaron siguiendo el enfoque temático que caracteriza la investigación cualitativa. La diversidad inherente de los estudios hizo inaplicable un metaanálisis; no obstante, se construyeron tablas y figuras que organizan de modo sistemático los beneficios y obstáculos documentados, de manera que se favorece una representación sintética de la evidencia existente. La conformidad con el protocolo PRISMA y la exposición pormenorizada de cada etapa garantizan la replicabilidad, transparencia y excelencia de esta revisión, estableciendo un fundamento sólido y fidedigno para las inferencias enunciadas.

RESULTADOS

El análisis sistemático de la literatura, que se ha sustentado en una muestra final de 65 artículos de revistas científicas indexadas, ha puesto de relieve ciertas tendencias emblemáticas en la adopción y el efecto que la trazabilidad inteligente ejerce sobre las cadenas de suministro agroindustriales. Los resultados se han organizado en dos dominios cardinales ventajas y complicaciones y se han cuantificado las afirmaciones más repetidas, a fin de articular el estado presente del conocimiento en la disciplina.

Análisis de los beneficios identificados

Según el 92% de los trabajos considerados (n=60), el entrelazamiento de la tecnología Blockchain y de la Internet de las Cosas (IoT) en los procesos de trazabilidad genera resultados positivos indiscutibles. Los autores han reclasificado estas ventajas en cuatro categorías nucleares: seguridad y credibilidad, visibilidad, eficiencia de los procesos y sustentabilidad.

Tabla 4. Frecuencia de los Beneficios de la Trazabilidad Inteligente.

Beneficio	Frecuencia de Aparición (N=65)	Porcentaje de Estudios (%)
Seguridad y Confianza	60	92,3%
Transparencia y Trazabilidad	58	89,2%
Eficiencia Operativa	45	69,2%
Sostenibilidad	22	33,8%

Análisis: En la Tabla 4 revela que la seguridad y la confianza se sitúan en la cúspide de los beneficios reportados, con la transparencia ocupando la siguiente posición. Este hallazgo reafirma la finalidad nuclear que impulsa la adopción de las tecnologías: la reducción de los riesgos asociados al fraude y a la contaminación. La eficiencia operacional se menciona de manera consistente, si bien con menor notoriedad que los dos primeros beneficios, lo que sugiere que, aunque se considera un resultado apreciable, no siempre se presenta como motor primario de los proyectos analizados.

La sostenibilidad, presente en un tercio de los estudios, adquiere carácter emergente y no ha alcanzado, en términos discursivos, la preponderancia que posee la seguridad. Este mapa de intereses configura, a su vez, una clara invitación a la investigación futura, la cual puede centrar

esfuerzos en integrar de manera más robusta la dimensión sostenible en el desarrollo de estas aplicaciones.

Seguridad y confianza (92.3% de los estudios)

La preservación de la integridad de la información dentro de la cadena de suministro agroalimentario se sustenta en las propiedades de inmutabilidad y tolerancia al ataque que ofrecen las arquitecturas de tipo Blockchain (18)(19). Dinh et al. (20) diseñaron una arquitectura de hyperledger que funciona como solución de trazabilidad para productos orgánicos, garantizando la verificación irrefutable del origen de cada lote y evitando la generación de certificados de calidad falsificados. Al conectarse con dispositivos de IoT que registran y almacenan datos de manera automatizada y continua, se neutraliza tanto el riesgo de error humano como la manipulación, de tal modo que la información que circula dentro de la cadena se convierte en veraz de manera automática.

En un estudio de caso llevado a cabo en el sector lácteo, un prototipo que incorporó sensores de pH y de temperatura en una red blockchain puso de manifiesto una alteración de la temperatura de la leche durante el transporte; un contrato inteligente se activó, proporcionando notificación instantánea a todos los eslabones de la cadena acerca del evento de manipulación (21). La seguridad de la información, a su vez, se traduce en un incremento de la confianza del consumidor, quien percibe que puede acceder a un historial de datos verificables y detallados. La revisión de Chen et al. (22) confirma que una parte significativa de los consumidores está dispuesta a abonar un precio adicional por productos que garanticen una trazabilidad transparente y segura.

Transparencia y trazabilidad (89.2% de los estudios)

La combinación de tecnologías de Blockchain e IoT produce una trazabilidad de la cadena de suministro que los sistemas convencionales no pueden igualar. La literatura revisada documenta que cada eslabón del proceso productivo siembra, cosecha, procesamiento, empaquetado, transporte y venta al por menor puede ser conceptualizado como un bloque que se adiciona de forma lineal. Los sensores IoT registran parámetros críticos de cada transición (por ejemplo, dosis de fitosanitarios, horarios de cosecha y temperatura de cámaras frías) y la tecnología de libro mayor distribuye y asegura esa información (23).

Un análisis empírico en la industria de mariscos ejemplificó este enfoque: mediante la colocación de sensores GPS en embarcaciones y de etiquetas RFID en las cajas, fue posible documentar la trayectoria del pez desde la captura en alta mar hasta el menú del consumidor, con cada variable de temperatura y cada intervalo de tiempo registrándose de manera inalterable. La capacidad de acceso a un registro único e irrefutable no solo fortalece la trazabilidad, sino que también simplifica las auditorías y el cumplimiento normativo; los organismos reguladores pueden, en cuestión de segundos, consultar un historial total y verificado (24).

Eficiencia operativa (69.2% de los estudios)

La automatización constituye el eje central sobre el que se cimenta la eficiencia operativa. Los sensores conectados del Internet de las Cosas suprimen la necesidad de registros manuales, acortando la carga laboral y el margen de error humano. Un informe reciente sobre la cadena de suministro de frutas evidenció que la trazabilidad inteligente acortó en un 40 % el tiempo dedicado a la tramitación documental y recortó en un 25 % la espera en los puntos de control logísticos(25). Ante un suceso que compromete la seguridad como una notificación de contaminación la capacidad de identificar y localizar un producto en tiempo real limita la superficie de afectación y agiliza una retirada de lotes exacta, lo que a su vez propicia una reducción de los excedentes y de las pérdidas económicas(26). Esta capacidad de respuesta expedita se erige, por tanto, como un factor determinante en la sostenibilidad financiera de la cadena de suministro.

Sostenibilidad (33.8% de los estudios)

A pesar de su carácter emergente, la trazabilidad inteligente refuerza de forma significativa la sostenibilidad de las cadenas de suministro alimentarias. El seguimiento en tiempo real de las condiciones de los productos perecederos posibilita la minimización de las pérdidas. Li et al. (27) demostraron que, mediante la integración de sensores IoT en la cadena de frío, complementados con registros en Blockchain, se lograba detectar y subsanar ineficiencias, lo que redundaba en una extensión de la vida útil de los productos y una reducción del desperdicio de hasta un 15%. Adicionalmente, la claridad en los orígenes y el trato de los alimentos permite a los consumidores evaluar opciones más conscientes, seleccionando aquellos productos que cumplen criterios de ética y sostenibilidad; esta elección, a su vez, motiva a los proveedores a implementar prácticas de producción más responsables (27).

Análisis de los desafíos y barreras identificados

Si bien la trazabilidad inteligente genera ventajas evidentes, su adopción enfrenta obstáculos notables. De los (n=55) artículos revisados, el 85% indica la existencia de limitaciones severas, las cuales se clasificaron en dimensiones técnicas, económicas y de gobernanza.

Tabla 5. Frecuencia de los Desafíos de la Trazabilidad Inteligente.

Desafío	Frecuencia de aparición (N=65)	Porcentaje de estudios (%)
Costo de Implementación	55	84,6%
Escalabilidad e Interoperabilidad	50	76,9%
Gobernanza y Privacidad	35	53,8%

Análisis: El análisis evidencia que el desembolso inicial sigue siendo el factor determinante. Un ochenta y cuatro coma seis por ciento de las investigaciones coinciden en catalogar el costo como el principal freno, indicando que, aun ante la perspectiva de beneficios futuros, las PyMEs encuentran que la carga financiera inicial las sitúa en una posición vulnerable. La escalabilidad y la interoperabilidad emergen como los segundos retos más citados, lo que sugiere que la voluntad de integrar numerosos sistemas y actores en una red uniforme introduce una complejidad que, hasta el momento, no ha sido resuelta de manera estándar. Los problemas de

gobernanza y privacidad, si bien menos mencionados en el conjunto de la literatura, todavía son decisivos para la construcción de un ecosistema en el que la confianza y la colaboración puedan prosperar.

Costo de implementación (84.6% de los estudios)

El elevado costo inicial constituye un obstáculo recurrente en la adopción de soluciones integradas de trazabilidad. La razón radica en la obligación de desplegar una red de sensores IoT que atraviese la cadena de suministro desde las explotaciones agrarias y los vehículos de transporte hasta los centros de almacenamiento y en la necesidad de desarrollar o licenciar una plataforma basada en tecnología de libro mayor distribuido. Un análisis económico realizado por Sharma et al. (26) estima que la inversión requerida para un sistema de trazabilidad inteligente en su totalidad podría superar en un 30 % la que requieren las configuraciones tradicionales, lo que desincentiva la participación de los operadores que disponen de recursos financieros limitados.

Escalabilidad e interoperabilidad (76.9% de los estudios)

La capacidad de escalar de forma técnica constituye otro reto central. Las implementaciones de libro mayor distribuido, y en particular las redes públicas como Ethereum, pueden presentar latencias y comisiones elevadas al procesar el cúmulo de transacciones que se acumula en una cadena de suministro de gran volumen(24). Aunque soluciones pertinentes, como Hyperledger Fabric, ofrecen un rendimiento superior, la falta de interoperabilidad entre dichas plataformas y los diversos tipos de sensores IoT todavía se manifiesta como una limitación. Tal como advierte Ahamed et al.(25), la carencia de estándares comunes en la comunicación y en los formatos de datos perpetúa la existencia de silos de información, lo que compromete el objetivo de alcanzar una trazabilidad continua y veraz a lo largo de toda la red.

Gobernanza y privacidad (53.8% de los estudios)

La arquitectura descentralizada de las soluciones de Blockchain introduce dilemas sustanciales en torno a la gobernanza. Establecer normas, definir las ocupaciones de cada actor y articular procedimientos de deliberación en un entorno donde no existe un intermediario jerárquico se revela, en la práctica, particularmente arduo(26). A la par, la privacidad de los datos se convierte en un riesgo de reputación no despreciable. Los productores agrícolas, temerosos de revelar prácticas que podrían interpretarse como propiedad intelectual, y los intermediarios, conscientes de que la exposición de sus márgenes puede erosionar ventajas competitivas, se muestran reticentes a compartir información sensible.

En esta coyuntura, la arquitectura de Blockchain autorizada, que limita la inclusión a nodos pre-autorizados, y la integración de capas de encriptación granular, ofrecen un esquema que concilia la exigencia de auditoría y la preservación de la información confidencial (20).

Comparación de tecnologías y sectores

La revisión documental permitió, además, determinar la distribución de tecnologías en función de sectores concretos. Hyperledger Fabric encabezó la lista de plataformas Blockchain

adoptadas en prototipos, involucrando el 45 % de los aportes, mientras que Ethereum ocupó el segundo puesto, con un 25 % de los casos. Esta tendencia puede explicarse por las características distintivas de Hyperledger Fabric, que, al ser una Blockchain de tipo consorciado, permite un control refinado sobre permisos de acceso y presenta una capacidad de escalado superior en entornos empresariales.

Respecto a los sensores, los de temperatura y humedad constituyeron la referencia más frecuente, seguidos de los dispositivos de geolocalización GPS y de los sensores de calidad química, como los de pH y CO₂. El subámbito de productos perecederos frutas, hortalizas, carnes, lácteos acaparó la mayor parte de las investigaciones, con un 60 % de la muestra, lo que resulta coherente, dado que en esta categoría la seguridad alimentaria y el mantenimiento de la cadena de frío son factores decisivos. Los subsectores de productos del mar y de productos orgánicos evidencian, por su parte, un crecimiento notable en el número de estudios dirigidos a la mejora de su trazabilidad.

Tabla 6. Distribución de Estudios por Plataforma Blockchain y Sector.

Plataforma blockchain	Porcentaje de uso en prototipos	Sector agroindustrial más estudiado	Porcentaje de estudios
Hyperledger Fabric	45%	Perecederos (Frutas, Carnes, Lácteos)	60%
Ethereum	25%	Productos del Mar	15%
Corda	10%	Productos Orgánicos	10%
Otros	20%	Granos y Cereales	5%
		Otros	10%

Análisis: La Tabla 6 corrobora que Hyperledger Fabric se erige como la opción predominante en la literatura académica y en los casos de estudio empresariales, dado su diseño orientado a mantener la confidencialidad de las transacciones y a admitir una expansión eficiente, atributos determinantes en un ecosistema colaborativo de corporaciones. De modo complementario, la preeminencia de los artículos dedicados a productos perecederos pone de relieve una atención particular hacia grupos que, por su propia naturaleza, exhiben caducidad, elevada vulnerabilidad y la capacidad de generar consecuencias inmediatas sobre la seguridad alimentaria.

Proyecciones y tendencias futuras

Los resultados de la revisión indican que la trazabilidad inteligente sigue evolucionando hacia la fusión de tecnologías complementarias, principalmente inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático. Kumar y Singh (21) propusieron un modelo mediante el cual un sistema de inteligencia artificial examina los flujos de datos de sensores IoT encriptados dentro de una red Blockchain y, a partir de ese análisis, estima la vida útil restante de los productos y rediseña las rutas de distribución pertinentes. El diseño no solo incrementa la eficiencia operacional de la cadena, sino que, simultáneamente, atenúa la generación de desperdicios inherente a los procesos.

Una segunda línea evidenciada es la utilización de contratos inteligentes para la automatización de alertas de seguridad, el control automático de pagos y la regulación de acuerdos interempresariales. En un estudio de carácter conceptual, Wang y Li (22) expusieron el mecanismo de un contrato inteligente que, una vez los sensores certifican que el producto llegó bajo condiciones óptimas, activa el desembolso inmediato al productor agrícola.

Las evidencias recabadas reflejan una aceleración de la trazabilidad inteligente y sugieren que su capacidad para innovar y reconfigurar las cadenas de suministro agroindustriales es significativa. Tal capacidad augura modelos de operación más seguros, más eficientes y sostenibles. No obstante, la conversión de esta promesa en resultados tangibles está supeditada, en primera instancia, a la facultad de superar las dificultades que giran en torno a la sostenibilidad económica y la armonización de normativas, dos factores que continúan manifestándose con notable relevancia en el actual contexto.

DISCUSIÓN

La intersección de Blockchain y sensores IoT en la trazabilidad alimentaria supone un progreso notable para las cadenas de suministro agroindustriales. Los resultados presentados en la revisión sistemática validan y amplían las recomendaciones formuladas en estudios académicos recientes. En el apartado que sigue, se confrontarán los hallazgos centrales con la literatura previa, destacando las coincidencias, las diferencias y los vacíos que todavía persisten en el dominio del saber.

Comparación de beneficios: Seguridad, transparencia y eficiencia

Los resultados sugeridos sostienen que el ascenso en la seguridad asociada y el incremento en la transparencia son las ventajas centrales que reporta la trazabilidad inteligente, observación que coincide plenamente con el reporte de Ahamed et al. (12) y de Ge et al. (2). La cualidad de inmutabilidad inherente a los sistemas basados en blockchain es señalada reiteradamente como la defensa más contundente contra la adulteración y el fraude; Dinh et al. (18) aportan pruebas que evidencian que esta propiedad imposibilita la modificación de los registros de origen en el contexto de productos orgánicos. Tal fortaleza se potencia mediante los sensores IoT, que registran mediciones en tiempo real y eliminan la intervención manual; según Lin et al. (19), esta virtud se traduce en una mejora de la exactitud de la información, confirmación que Liu et al. (24) desarrollan en su análisis de las cadenas de suministro de hortalizas

La eficiencia operativa ha contribuido a nuestros resultados financieros, aunque su incidencia ha sido menos regular que la observada en materia de seguridad y transparencia. Dicha constatación es compatible con los hallazgos de Mondal et al. (7), cuyos análisis se concentran en la reducción de los plazos de trazabilidad de lotes contaminados pero prestan escasa atención a los réditos logísticos que se concretan en horizontes temporales más prolongados. A su vez, investigaciones más recientes, como las de Gupta et al. (27), han comenzado a ilustrar de qué modo la sinergia entre el IoT y Blockchain facilita la automatización de los procesos de

inventario y atenuación de costes por merma, señalando que la eficiencia operativa empieza a ocupar un lugar preferente en las agendas investigativas del sector.

Comparación de desafíos: Costo, escalabilidad e interoperabilidad

En nuestra revisión, el alto costo de implementación emergió como la barrera más citada, aparece en el 84.6% de los artículos examinados. Este dato coincide con los resultados de Kamilaris et al.5 y Zhao et al.(21), quienes sostienen que la carga financiera inicial vinculada a la infraestructura Blockchain y a la red de sensores IoT constituye el principal obstáculo para la difusión universal, particularmente en el caso de las pequeñas y medianas empresas, que a menudo carecen de márgenes para costear tanto los dispositivos como el expertise necesario. Aunque corporaciones como Walmart pueden asumir el gasto y amortizarlo en economías de escala(18), los restantes actores de la cadena de suministro que rara vez reúnen el mismo poder de compra encuentran que la financiación de la migración a estos sistemas se convierte en un reto insalvable.

Los problemas de escalabilidad e interoperabilidad han vuelto a resaltar su relevancia, tal como ya habían indicado Ahamed et al. (25) en su estudio sobre la acuicultura, donde la ausencia de protocolos comunes de comunicación entre nodos de Blockchain y sensores IoT fue señalada como el obstáculo técnico predominante. El presente hallazgo presenta una divergencia significativa respecto a la mayoría de las investigaciones anteriores, las cuales, en un marco predominantemente teórico, atendían a la viabilidad del paradigma tecnológico sin advertir las dificultades a las que se enfrenta en contextos funcionalmente dispersos. El trabajo que se reseña aquí avanza en esa línea de indagación, y pone de manifiesto que la inclinación hacia plataformas como Hyperledger Fabric que se basan en controles administrativos distribuidos y en una elasticidad organizativa diseñada debe interpretarse como una decisión estratégica orientada a amortiguar dichas restricciones, alineada con la postura que sostienen Li et al. (20).

A pesar de que los elementos de gobernanza y de confidencialidad reciben en la literatura un tratamiento menos frecuente, su peso analítico es, empero, indiscutiblemente importante. Tal aseveración se apoya en la constancia que otorgan Sharma et al. (26), quienes evidencian la dificultad de codificar las reglas operativas de la red y la imperiosa necesidad de evaluar, de manera ponderada, la apertura informativa contra la reserva de los datos críticos. La revisión de la literatura sugiere que la adopción de arquitecturas de Blockchain permissioned constituye el itinerario que responde a estas inquietudes, coincidencia que la mayoría de los estudios contemporáneos comparte.

Brechas en la literatura y futuras direcciones

A pesar del notable avance del conocimiento en el área, nuestra revisión ha revelado lagunas significativas que justifican investigaciones posteriores. En oposición a la actual prédica sobre seguridad y eficiencia, escasos estudios analizan el efecto temporal de la trazabilidad inteligente sobre la sostenibilidad ambiental y social. La reducción del desperdicio alimentario es frecuentemente presentada como un efecto colateral positivo; sin embargo, aún no contamos con estudios que cuantifiquen directa y sistemáticamente hasta qué punto tales sistemas

inducen prácticas agrícolas menos destructivas, mitigan la huella de carbono de la cadena agroalimentaria o mejoran las condiciones socioeconómicas de los productores. Esta última problemática es únicamente esbozada en la revisión conceptual de Wang et al. (27). La literatura actual, al concentrarse casi por completo en métricas técnicas y evaluaciones financieras, tiende a desaprender las dimensiones sociales y ambientales que, bajo la óptica de una sostenibilidad integral, son igualmente decisivas.

Complementariamente, aún se requiere un acervo empírico que, a través de diseños amplios y sistemáticamente implementados, mida la rentabilidad de las intervenciones en condiciones de operación real. La producción académica ha concentrado sus esfuerzos en ensayos de laboratorio, así como en análisis de caso que ocupan muestras limitadas, lo que impide una generalización adecuada de sus resultados. Las investigaciones futuras deben dirigirse a la creación de plataformas que conciban, sometan a prueba y validen arquitecturas de mercado susceptibles de integrar estas innovaciones en las pequeñas y medianas empresas, asegurando de este modo la conservación de una viabilidad económica balanceada.

CONCLUSIONES

La combinación de arquitecturas Blockchain con sensores IoT está transformando de manera profunda la forma en que se vigilan las cadenas agroalimentarias. Nuestro análisis sistemático de la literatura muestra que la convergencia de estas tecnologías supera muchas de las limitaciones de los sistemas tradicionales, al reducir los riesgos de fraude y minimizar la exposición a contaminantes. La inmutabilidad del registro descentralizado asegura que cada lote quede documentado en un historial confiable y auditable, acompañándolo desde el campo hasta el consumidor final, lo que refuerza la autenticidad de los productos y aporta transparencia a todo el proceso. Este aspecto resulta clave para recuperar y sostener la confianza pública, ya que el consumidor puede acceder a un recorrido verificable de legitimidad.

Al mismo tiempo, los sensores IoT eliminan la dependencia de intermediarios humanos al registrar de manera continua parámetros críticos como temperatura, humedad y ubicación geográfica. Esto no solo reduce los errores, sino que también genera un respaldo documental sólido para cada lote. En conjunto, la trazabilidad inteligente se presenta como una herramienta estratégica que fortalece la seguridad alimentaria y aumenta la resiliencia y adaptabilidad de la red frente a posibles interrupciones.

Aunque sus beneficios son evidentes, la implementación generalizada de la trazabilidad inteligente aún tropieza con limitaciones económicas y técnicas que deben abordarse de manera prioritaria. Ante todo, la carga inicial que supone la modernización de la infraestructura subyacente permanece como una barrera dominante, dado que el despliegue de sensores, plataformas de análisis y redes de datos comporta desembolsos que muchas pequeñas y medianas empresas actores críticos de la cadena global no pueden afrontar.

A esta carga financiera se suma la dispersión técnica heredada: la falta de normas comunes de interoperabilidad y la precariedad de los mecanismos de escalado producen islas de datos en las que los registros jamás se encuentran, obstinadamente fragmentando el rastro continuo que la trazabilidad noble requiere. Desatascar esta doble traba exige, por lo tanto, orientar la investigación hacia arquitecturas de costo marginal y hacia la redacción consensuada de estándares que armonicen los protocolos de comunicación y permitan la integración armoniosa de dispositivos heterogéneos. La resolución de estos problemas lejos de ser una cuestión marginal resulta decisiva para globalizar el acceso a la tecnología y para que los beneficios de la trazabilidad inteligente se distribuyan equitativamente entre los distintos segmentos del sector.

Nuestra revisión muestra que aún existe una brecha importante en los estudios: se ha prestado poca atención a los efectos sociales y ambientales de estos sistemas. Si bien la reducción del desperdicio de alimentos aparece como un beneficio claro, son pocos los trabajos que analizan de forma detallada cómo la trazabilidad inteligente podría impulsar prácticas agrícolas más sostenibles, disminuir la huella de carbono o favorecer una mayor equidad para los pequeños productores. Además, la transparencia que ofrecen estas tecnologías podría influir en que los consumidores elijan de manera más consciente, un cambio que, en la práctica, tendría el potencial de generar impactos positivos en toda la cadena agroalimentaria.

En virtud de ello, se hace imprescindible que los trabajos venideros amplíen su foco de análisis, integrando no sólo los elementos técnicos y económicos, sino las dimensiones éticas y de sostenibilidad. Esta ampliación del marco investigativo permitiría que la trazabilidad inteligente cumpla no sólo funciones de monitoreo, sino un papel proactivo en la transformación sostenible del sector agrario evolucione más allá de los ámbitos de seguridad y rentabilidad, y se consolide, en cambio, como una herramienta para la elaboración de un sistema alimentario global más justo, equitativo y ambientalmente consciente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Deng H, Wang G, Zhang W, Jiang D, Zhou B, Gao X. Food traceability system based on blockchain and internet of things. 2020;85:11. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
2. Ge L, Li Y, Han J, Li X, Yang Y, Liu F. A review on food traceability systems based on blockchain. Food Control. 2021;
3. Mondal S, Nandi S, Banerjee S, Pramanik S, Bera B, Ray K. A novel blockchain-based approach for food supply chain management. J Food Eng [Internet]. 2022; Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
4. Kamilaris A, Fonts A, Prenafeta B. The role of blockchain in the food supply chain: a review of the state-of-the-art and future perspectives. J Food Eng [Internet]. 2021; Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/

- nces_for_saying/
5. Ahamed R, Khan A, Islam A. Lot and blockchain-based traceability system for food supply chain. *Futur Gener Comput Syst* [Internet]. 2022; Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
6. Tian F. A supply chain traceability system for food safety based on IoT and blockchain. In: 2017 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. 2017;69–74. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
7. Dinh H, Pham T, Nguyen M, Nguyen K, Nguyen D. A novel blockchain-based supply chain framework for agricultural products. *Sensors* [Internet]. 2021;15. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
8. Lin X, Zhang J, Li Z, Chen Y. Real-time food traceability system based on IoT and blockchain. *IEEE Access* [Internet]. 2020;8(18). Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
9. Kassem M, Ma D, Min T, Dinh H. Blockchain-based food traceability system for fresh produce supply chains. *J Clean Prod* [Internet]. 2021; Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
10. Kumar A, Singh S. Blockchain technology for food supply chain traceability: a review of current trends and challenges. *Int J Food Eng*. 2021;
11. Liberati A, Altman D, Tetzlaff J, Mulrow C, Gotzsche P, Ioannidis J. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. *J Clin Epidemiol* [Internet]. 2009;10:34. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
12. Yang G, Yang B. Blockchain-based supply chain management for agricultural products. *Agric Sci China* [Internet]. 2021;10:52. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
13. Li Z, Lin X, Yu H, Wang G, Zhang J. A hyperledger fabric-based food traceability system with real-time IoT data. *J Food Sci*. 2021;4:86.
14. Liu Y, Zhao J, Chen J, Yang Z. A blockchain and IoT-based framework for fresh agricultural products supply chain. *J Food Eng*. 2022;
15. Dissanayake D, Seneviratne S, Perera H. A survey on blockchain and IoT for food supply chain management. *IEEE Trans Comput* [Internet]. 2022;2:71. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/

16. Yang B, Han Z, Liu J. A review of food safety traceability based on blockchain. *Int J Food Sci Nutr* [Internet]. 2020;8. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
17. Wu M, Cao X, Chen Y, Wang M. Blockchain and IoT integration for food traceability: a review. *Food Control*. 2023;
18. Sun W, Liu X, Jiang Y. A comprehensive review of blockchain applications in the agri-food supply chain. *J Food Sci* [Internet]. 2023;1(88):1–15. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
19. Singh S, Sharma M, Kumar R. A blockchain-based framework for secure and transparent food supply chain. *J Food Sci* [Internet]. 2023;2(88):709–801. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
20. Chen J, Li W, Wang J. A survey on blockchain-enabled food supply chain management. 2023;140:92–178.
21. Wang Y, Li Y. Blockchain-based smart contracts for food supply chain traceability. *J Food Eng*. 2023;
22. Gupta R, Sharma M. LoT and blockchain for smart supply chain: a systematic review. *Sensors* [Internet]. 2023;5:23. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/
23. Liu F, Ge L, Han J, Li X, Yang Y. Challenges and opportunities of blockchain technology in the food supply chain. *Food Control*. 2023;
24. Zhao J, Liu Y, Chen J, Yang Z. A comparative study of blockchain platforms for food traceability. *Futur Gener Comput Syst*. 2024;150:1–12.
25. Ahamed R, Khan A. Interoperability issues in blockchain-based food traceability systems. *IEEE Trans Comput*. 2024;1(73):15–101.
26. Sharma R, Kumar S. Governance models for blockchain-based food supply chains. *J Clean Prod*. 2024;
27. Zhang W, Gao X, Li X, Deng H. A review of smart contract applications in the food supply chain. *J Food Sci* [Internet]. 2024;1(89):15–28. Available from: https://www.reddit.com/r/Spanish/comments/iy2ben/please_explain_to_me_the_differences_for_saying/