

Sistema de trazabilidad de cacao soportado en Internet de las cosas

IoT and 4.0 technologies for traceability and food safety in cocoa

PhD. Jorge Eliecer Gómez Gómez¹, Ing. Camilo Andrés Parra Urueta¹
Ing. Juan José Guzmán Pineda¹

¹ Universidad de Córdoba, Ingeniería de sistemas, Grupo de investigación Sócrates, Montería, Córdoba, Colombia.

Correspondencia: jeliecergomez@correo.unicordoba.edu.co

Recibido: 01 julio 2024. **Revisado:** 29 octubre 2024. **Aceptado:** 18 noviembre 2024. **Publicado:** 01 enero 2025.

Cómo citar: J. Gómez Gómez, C. A. Parra Urueta, y J. J. Guzmán Pineda, «Sistema de trazabilidad de cacao soportado en Internet de las cosas», RCTA, vol. 1, n.º 45, pp. 204–215, ene. 2025.

Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/3283>

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: Esta investigación asegura la trazabilidad y seguridad alimentaria en el proceso agroindustrial del cacao, desde la semilla hasta la comercialización. Se desarrolló un sistema de trazabilidad basado en Laravel, una aplicación web y una API REST para la gestión y comercialización, y un dispositivo IoT con sensores (Raspberry Pi) para monitorear la fermentación, cumpliendo la norma NTC 1252. El proyecto, en Tierralta, Córdoba, involucró tres fases: caracterización de necesidades de productores, desarrollo del sistema y pruebas con capacitación. Además, se implementó una línea de tiempo interactiva con Next.js para visualizar procesos. Esta solución mejora la calidad del producto, optimiza recursos, y genera datos clave para decisiones futuras, permitiendo la sistematización y estandarización de procesos, así como la identificación de fortalezas y debilidades en la cadena de producción del cacao.

Palabras clave: trazabilidad, seguridad alimentaria, IoT, industria del cacao, tecnología agrícola.

Abstract: This research ensures traceability and food safety throughout the cocoa agro-industrial process, from seed selection to commercialization. A traceability system was developed using Laravel, a web application, and a REST API for management and commercialization, along with an IoT device equipped with sensors (Raspberry Pi) to monitor fermentation, complying with the NTC 1252 standard. The project, conducted in Tierralta, Córdoba, involved three phases: characterization of producers' needs, system development, and testing with training. Additionally, an interactive timeline was implemented using Next.js to visualize processes. This solution improves product quality, optimizes resources, and generates key data for future decision-making, enabling the systematization and standardization of processes, as well as the identification of strengths and weaknesses across the cocoa production chain.

Keywords: traceability, food safety, IoT, cocoa industry, agricultural technology.

1. INTRODUCCIÓN

El cacao es un producto agrícola de mucha relevancia económica a nivel mundial. Países como Ecuador son reconocidos por la calidad de su cacao, lo que les permite exportar productos derivados como la manteca y el aceite de cacao a mercados exigentes. Sin embargo, la participación en estos mercados puede verse afectada por la falta de certificaciones de calidad y la necesidad de innovar para desarrollar productos con mayor valor agregado [1].

El cultivo y procesamiento del cacao también tienen un impacto social significativo. En regiones como Santander, Colombia, el cacao es un producto insigne que ha ayudado a las comunidades a desarrollarse y a enfrentar desafíos económicos, especialmente en tiempos de incertidumbre global como la postpandemia [2].

La industria del cacao enfrenta varios desafíos que afectan su sostenibilidad y crecimiento, donde se destacan:

- La calidad del cacao puede variar significativamente debido a factores como las condiciones de cultivo y los métodos de procesamiento. Esto afecta su utilidad [3].
- Mantener la seguridad alimentaria es crucial, especialmente en mercados internacionales donde se requieren certificaciones estrictas para garantizar la calidad y seguridad de los productos derivados del cacao [1].

La trazabilidad se ha convertido en un requisito esencial en la cadena de suministro de alimentos debido a la necesidad de minimizar riesgos para asegurar la calidad y confiabilidad de los productos. Este sistema permite rastrear el producto a lo largo de toda la cadena de suministro, compartiendo información entre los diferentes actores involucrados. Esto no solo ayuda a cumplir con las normativas requeridas, también proporciona la capacidad de gestionar información en tiempo real, garantizando la inocuidad de los alimentos mediante herramientas tecnológicas que permiten un seguimiento completo. La implementación de sistemas de trazabilidad es relevante en productos como el cacao, donde la calidad puede variar significativamente dependiendo de factores como el cultivo, y el procesamiento. La trazabilidad ayuda a asegurar que los productos cumplen con los estándares de calidad esperados por los consumidores y auditores [4].

La seguridad alimentaria es crucial en la producción de cacao debido a los riesgos asociados con la falta de control en el proceso de producción, como contaminaciones o inconsistencias en la calidad. La seguridad alimentaria no solo implica la prevención de contaminaciones físicas, químicas o biológicas, sino también la garantía de que los productos cumplen con los estándares de calidad y seguridad [5]. La ausencia de un sistema efectivo de trazabilidad dificulta el seguimiento del cacao desde su origen hasta el consumidor final, lo que puede resultar en problemas de calidad y una incapacidad para gestionar eficientemente la seguridad alimentaria. Además, la falta de transparencia en la cadena de suministro facilita prácticas no éticas, como la explotación laboral y el comercio no sostenible [6].

El uso del Internet de las Cosas (IoT) en la fermentación del cacao permite un monitoreo en tiempo real de las condiciones ambientales, lo que asegura una fermentación adecuada y consistente. Esto facilita la trazabilidad del producto a lo largo de toda la cadena de suministro. Esta investigación busca implementar un sistema de trazabilidad que aporte a la seguridad alimentaria en la cadena agroindustrial del cacao utilizando tecnologías de la Industria 4.0 e IoT. El objetivo es apoyar la calidad y seguridad del cacao, sino también proporcionar datos valiosos para la toma de decisiones futuras.

Este artículo se estructura comenzando con una revisión de la literatura relacionada con la tecnología 4.0 aplicada al sector del cacao. Luego, se describe la metodología implementada, organizada en tres fases principales:

- Fase 1: Caracterización de Necesidades y Diseño de Requisitos.
- Fase 2: Desarrollo del Sistema de Trazabilidad y Dispositivo IoT.
- Fase 3: Pruebas en Territorio y Capacitación del Personal.

Posteriormente, se presentan los resultados obtenidos en cada fase, seguidos de las discusiones generadas a partir de esta investigación. Finalmente, se exponen las conclusiones del estudio y se proporcionan las referencias bibliográficas utilizadas.

2. ESTADO DEL ARTE

El presente estado del arte se estructura en torno a dos ejes temáticos principales. El primero se centra en las tecnologías IoT aplicadas en los procesos de

producción de cacao y la trazabilidad de este, destacando cómo estas herramientas tecnológicas contribuyen a mejorar la calidad y seguridad del producto. El segundo eje temático se enfatiza en la agricultura de precisión, en consonancia con los objetivos de esta investigación.

Para el primer eje temático encontramos que no hay muchas investigaciones aplicando las tecnologías mencionadas al cacao, sin embargo, se determinaron las siguientes investigaciones relevantes.

IoTcocoa – an IoT platform to assist gourmet cocoa production: Esta investigación presenta una plataforma basada en IoT para monitorear y controlar los procesos de fermentación y secado del cacao gourmet. El estudio muestra cómo el uso de middleware como capa intermedia entre hardware y software puede optimizar el tráfico de red y reducir la carga del servidor, lo que mejora los procesos críticos de fermentación y secado necesarios para producir cacao de alta calidad [7].

Combining REST and SNMP for HTTP traffic optimization: A case study on gourmet cocoa drying: Este artículo explora cómo la combinación de REST y SNMP puede optimizar el tráfico de HTTP durante el proceso de secado de cacao gourmet. Se destaca la implementación de una aplicación descentralizada (DApp) que captura datos de dispositivos IoT y los almacena en contratos inteligentes, mejorando así la seguridad y eficiencia del proceso de secado natural del cacao [8].

Assessment of Role of Innovative Technology through Blockchain Technology in Ghana's Cocoa Beans Food Supply Chains: Este estudio evalúa el papel de la tecnología blockchain en la cadena de suministro de cacao en Ghana, destacando cómo la integración de tecnologías innovadoras puede mejorar la trazabilidad y la transparencia en la producción de cacao, con un enfoque particular en la calidad y seguridad del producto final [9].

Enabling Privacy and Traceability in Supply Chains using Blockchain and Zero Knowledge Proofs: Esta investigación aborda la implementación de blockchain y pruebas de conocimiento cero para mejorar la privacidad y la trazabilidad en las cadenas de suministro. Aunque el estudio no se centra exclusivamente en el cacao, ofrece un marco útil que podría aplicarse para garantizar la integridad y la transparencia en la cadena de suministro de cacao [10].

SVM-Guided Dynamic Routing for Post-Harvest Quality Preservation in Smart Warehouses with IoT: Este artículo se enfoca en el uso de técnicas avanzadas como el enrutamiento dinámico guiado por SVM para preservar la calidad postcosecha en almacenes inteligentes, utilizando IoT. Si bien se centra en almacenes, las metodologías discutidas pueden ser aplicables para mejorar la trazabilidad y la gestión de calidad en la cadena de producción de cacao [11].

Diseño de un sistema de trazabilidad como soporte al modelo productivo de cacao en la cordillera nariñense colombiana: Este estudio presenta el diseño e implementación de un sistema de trazabilidad en la cordillera nariñense, Colombia. Utilizando un enfoque basado en cartografía social y el modelo en espiral, se diseñó un sistema que captura y consulta información clave para la toma de decisiones. El sistema está adaptado a las necesidades específicas de los productores, lo que permite una gestión más eficiente y personalizada del proceso productivo del cacao [12].

El segundo eje temático de este estado del arte se enfoca en la aplicación de la agricultura de precisión en el de cacao. La agricultura de precisión busca optimizar el manejo de los cultivos a través del uso de tecnologías avanzadas, como sensores, análisis de datos y modelado predictivo. En este contexto, las investigaciones que se detallan a continuación exploran cómo estas tecnologías pueden mejorar la eficiencia, reducir el desperdicio y asegurar la sostenibilidad en la producción de cacao, contribuyendo así a la competitividad de los productores en mercados exigentes.

Classification of Fresh Cocoa Beans with Pulp Based on Computer Vision: Este estudio presenta una técnica de visión por computadora para clasificar granos de cacao frescos con pulpa. La investigación utiliza operaciones morfológicas, clustering mediante k-means, un modelo de bolsa de palabras visuales y una máquina de soporte vectorial (SVM) para lograr una alta precisión en la clasificación, mejorando así el proceso de eliminación de la pulpa y estimación de la calidad del cacao. Este enfoque no solo optimiza la calidad del producto final, sino que también reduce el tiempo y la mano de obra necesarios en las pequeñas y medianas explotaciones cacaoteras [13].

Derivation of High Spatio-Temporal Resolution Leaf Area Index and Uncertainty Maps by Combining LAINet, CACAO, and GPR: Este estudio propone un marco para generar mapas de

índice de área foliar (LAI) y mapas de incertidumbre asociados con alta resolución espacio-temporal, utilizando una combinación de redes de sensores inalámbricos (LAINet), métodos de ajuste climático (CACAO) y regresión de procesos gaussianos (GPR). Este enfoque permite un monitoreo preciso de la vegetación, lo que es crucial para la agricultura de precisión y la validación de productos de LAI en regiones cacaoteras [14].

Object Detection Approach for Batch Detection of Cacao Bean Defects: Este estudio desarrolla un enfoque de detección de objetos para identificar defectos en lotes de granos de cacao utilizando técnicas avanzadas de visión por computadora. La detección temprana de defectos es esencial para garantizar la calidad del cacao, y esta investigación demuestra cómo la agricultura de precisión puede aplicarse eficazmente en el control de calidad postcosecha del cacao [15].

Estudio Relevante: Huertas Urbanas con Agricultura de Precisión en Ambientes Controlados: Este estudio explora la implementación de un sistema de agricultura de precisión en huertas urbanas utilizando ambientes controlados. Se destaca cómo la integración de sensores, sistemas de control automatizado y plataformas de monitoreo en tiempo real puede optimizar la producción de cultivos en condiciones climáticas adversas. Aunque el estudio se enfoca en cultivos diferentes al cacao, las metodologías y tecnologías discutidas son altamente aplicables al manejo del cacao en ambientes controlados, donde las variables como la temperatura, la humedad y la luz pueden ser cuidadosamente reguladas para maximizar la productividad y la calidad del producto final [16].

3. METODOLOGÍA

Esta investigación se estructura en las siguientes tres fases, continuación se describen cada una de ella.

3.1. Fase 1: Caracterización de Necesidades y Diseño de Requisitos.

En esta fase, se realizaron varios análisis en colaboración con la asociación Integrasinu para comprender en profundidad las necesidades específicas de los productores de cacao. Se estructuraron diferentes diagramas UML, incluyendo diagramas de secuencia, diagramas de casos de uso, diagramas de actividades y diagramas de secuencia. Estos diagramas ayudaron a visualizar de manera clara y detallada los procesos involucrados, permitiendo identificar los requisitos

clave del sistema de información necesario para la trazabilidad en la cadena agroalimentaria del cacao.

La Fig. 1 muestra el flujo de los 5 pasos de cómo se desarrollaron las interacciones realizadas para la caracterización de las necesidades y el diseño de los requisitos.

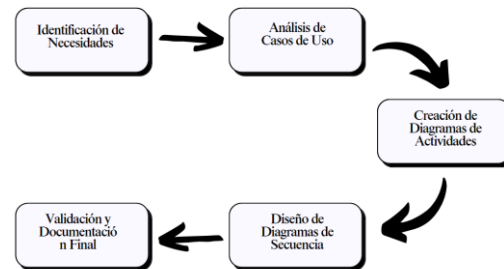


Fig. 1. Flujo de caracterización de necesidades y diseño de requisitos **Fuentes:** Elaboración Propia

3.2. Fase 2: Desarrollo del Sistema de Trazabilidad y Dispositivo IoT.

Con los requisitos de software definidos, se procedió a diseñar la arquitectura del sistema, asegurando que fuera escalable y mantuviera bajos costos de implementación. Durante esta fase, se evaluaron diversas tecnologías para garantizar que el sistema pudiera crecer de manera eficiente y cumplir con los objetivos de trazabilidad en la cadena agroindustrial del cacao. Se seleccionaron herramientas y frameworks que ofrecieran el mejor equilibrio entre rendimiento, escalabilidad y economía, lo que permitió un desarrollo ágil y alineado con las necesidades identificadas en la fase anterior.

Las tecnologías seleccionadas son:

Laravel para el desarrollo del sistema de trazabilidad lógico, debido a su capacidad de proporcionar escalabilidad y un rendimiento óptimo en entornos web. Laravel también ofrece herramientas robustas para la creación de API REST, que fueron esenciales para la integración de la línea de tiempo pública y la comercialización del cacao

Next.js fue seleccionado para el desarrollo del frontend, específicamente para la visualización interactiva de la trazabilidad del cacao en la línea de tiempo. Next.js permite un desarrollo rápido y eficiente, con un enfoque en la renderización del lado del servidor, lo que mejora la experiencia del usuario.

Raspberry Pi y Sensores IoT Se optó por utilizar Raspberry Pi debido a su bajo costo y flexibilidad,

junto con sensores de temperatura y humedad como DHT11 y DS18B20. Estos dispositivos son ideales para monitorear las condiciones críticas durante la fermentación del cacao.

La arquitectura del sistema brinda un enfoque modular y escalable, lo que permite futuras actualizaciones sin necesidad de reestructuraciones significativas. Los principales componentes del sistema incluyen una base de datos central, una API REST, la aplicación web, y los dispositivos IoT. Cada módulo del sistema (backend, frontend, IoT) fue diseñado e integrado de manera eficiente para facilitar la comunicación y sincronización de datos en tiempo real. Para el desarrollo de la aplicación web, se implementó funcionalidades que permiten gestionar los procesos de transformación del cacao, desde la postcosecha hasta la comercialización. Esto incluyó la capacidad de registrar, monitorear y visualizar datos de trazabilidad en tiempo real. Asimismo, Una línea de tiempo pública interactiva utilizando Next.js, que permite a los usuarios finales visualizar la trazabilidad del cacao desde la semilla hasta el producto final, proporcionando transparencia y generando confianza en los consumidores.

En cuanto a la integración del dispositivo IoT, Se configuró los sensores en una Raspberry Pi para recolectar datos críticos como la temperatura del material y la humedad relativa durante la fermentación, asegurando el cumplimiento de la norma NTC 1252. Este dispositivo fue integrado con el sistema de trazabilidad para enviar datos en tiempo real al servidor central, lo que permite un monitoreo continuo y la generación de alertas en caso de desviaciones en las condiciones críticas. Para garantizar que todos los componentes del sistema funcionaran de manera conjunta y sin problemas, Se realizaron pruebas de integración, incluyendo simulaciones de escenarios de uso real para verificar las funcionalidades del sistema. Con base en los resultados de estas pruebas, se realizó ajustes y optimizaciones que mejoraron el rendimiento y la usabilidad del sistema.

Finalmente, Se generó la documentación técnica detallada que abarca todos los aspectos del desarrollo del sistema, desde la arquitectura y el diseño hasta la implementación y las pruebas, lo cual es fundamental para el mantenimiento futuro y la capacitación de los usuarios. Adicionalmente, se creó manuales y guías de usuario para los productores y otros actores involucrados, explicando cómo utilizar las diferentes

funcionalidades del sistema y cómo interpretar los datos generados.

3.3. Fase 3: Pruebas en Territorio y Capacitación del Personal.

En esta fase, se llevaron a cabo capacitaciones presenciales y virtuales para garantizar que los usuarios finales comprendieran y pudieran utilizar eficazmente las herramientas desarrolladas. Las capacitaciones presenciales se realizaron en Tierralta, Córdoba, donde se entrenó a los productores en el uso del software de trazabilidad, el dispositivo IoT, y la visualización de la línea de tiempo. Durante estas sesiones, se proporcionó instrucción detallada sobre cómo operar el sistema de trazabilidad, cómo interpretar los datos recolectados por el dispositivo IoT, y cómo utilizar la herramienta de visualización para seguir la trazabilidad del cacao desde la semilla hasta el producto final.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentan por cada fase ejecutada en la metodología, continuación se evidencian.

4.1. Fase 1: Caracterización de Necesidades y Diseño de Requisitos.

En la Fig. 2 donde se evidencia el diagrama de proceso se identifican 3 eslabones, el primero son los procesos agros donde incluye la central de beneficio, el segundo es la transformación en la industria y por último la comercialización.

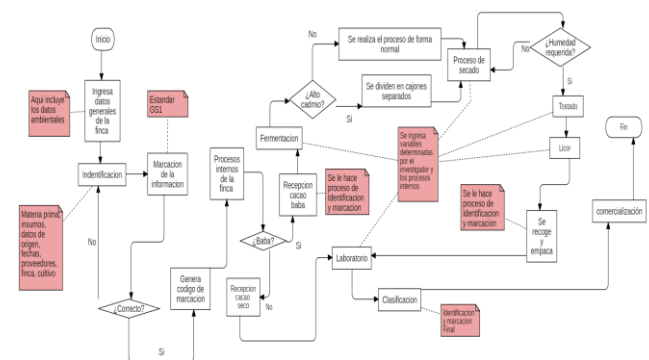
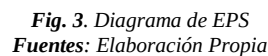


Fig. 2. Diagrama de procesos

Fuentes: Elaboración Propia

Al analizar la problemática con el diagrama anterior se detalló el diagrama de entradas, procesos y salidas (EPS) donde se determina la estructura del

Las variables ambientales de la fermentación son suministradas por un sistema embebido (rasberry, sensores y API'S), las variables de proceso son registradas por los campesinos o personal de campo y las variables científicas por investigadores.



- Gestión de Fincas para la fermentación del cacao en estado de baba
- Gestión de Vivero: Registro detallado de viveros, incluyendo información sobre el genotipo de cacao, aplicaciones de riego y agroquímicos.
- Gestión de Terreno: Registro de terrenos con la opción de añadir eventos significativos. Detalles sobre la preparación del terreno, con información sobre sombrero permanente y transitorio, vinculado a uno o varios procesos de viveros.
- Gestión de Siembra: Registro y gestión de actividades como riego, aplicación de agroquímicos y tratamientos del suelo.
- Gestión de Cosecha: Registro de una o varias cosechas asociadas a una siembra específica.
- Gestión de Fermentación: Incluye dos modalidades

- Fermentación en acopio: Selección de la finca, del dispositivo de monitoreo y del genotipo para la fermentación foránea.
- Fermentación en finca: Similar a la foránea, pero se selecciona la cosecha a fermentar en lugar del genotipo.
- Gestión de Secado: Selección del proceso de fermentación y registro de la cantidad de cacao seco al cerrar el proceso.
- Gestión de acopio: Generación de la orden de acopio para la creación de la guía de envío a la industria.

Los aspectos destacados de la investigación incluyen lo siguiente:

La idea de Schwan y Wheals sobre la influencia de la temperatura en la calidad del grano con la información más reciente del artículo sobre el rol crucial de la temperatura en la optimización de la actividad microbiana durante la fermentación [17], [18].

En esta fase se desarrolló un diagrama de arquitectura (Ver Fig. 4) que proporciona una visión modular de la solución, permitiendo una comprensión clara de cómo los diferentes componentes del sistema interactúan entre sí. La solución de trazabilidad se implementó como un software externo, diseñado para integrarse eficazmente con el dispositivo IoT. Este dispositivo

está equipado con una base de datos en SQLite, que actúa como un sistema de respaldo para salvaguardar los datos recolectados cuando la cobertura de internet falla, asegurando que no se pierda información crítica durante el proceso de fermentación. Esta estructura modular y resiliente permite que el sistema funcione de manera confiable incluso en entornos con conectividad limitada.

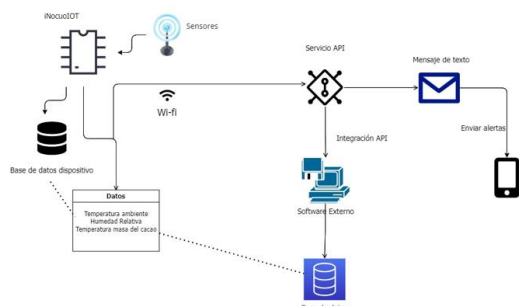


Fig. 4. Diagrama arquitectura
Fuentes: Elaboración Propia

El diagrama de clases (ver Fig. 5) para la primera etapa cubre las fases agro y poscosecha. Este diagrama es esencial para identificar y representar la abstracción de los objetos involucrados en el proceso, proporcionando una visualización clara de las relaciones entre ellos y cómo interactúan dentro del sistema de trazabilidad. La creación de este diagrama fue clave para estructurar y organizar los datos de manera coherente, facilitando el desarrollo e implementación del sistema de trazabilidad.

Para la segunda etapa, el siguiente diagrama de clases detalla los procesos:

Recepción de cacao: Gestiona la recepción de cacao de acuerdo con la norma NTC 1252, asegurando la calidad y clasificación del cacao recibido.

Tostión: Registra variables como temperatura y tiempo de tostado, junto con observaciones y procesos de reposo.

Molienda: Detalla el proceso de molienda, incluyendo peso inicial y final, pasos, y rendimiento.

Descascarillado: Parámetros como velocidad, aspiración y peso de los nibs obtenidos.

Refinación: Controla variables como temperatura, tiempo, rendimiento y tamaño de partículas.

Conchado: Registra la mezcla de ingredientes, incluyendo licor de cacao, manteca, azúcar y aditivos, junto con las condiciones del proceso.

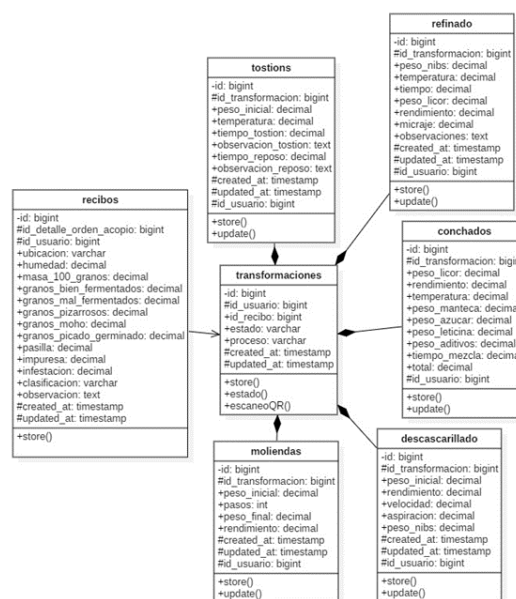


Fig. 5: Diagrama de clase segundo eslabón
Fuentes: Elaboración Propia

La figura 6 muestra capturas de pantalla relevantes de la solución. Cada módulo está diseñado para ser intuitivo y funcional, facilitando el acceso a la información y la gestión de los procesos críticos dentro del sistema.

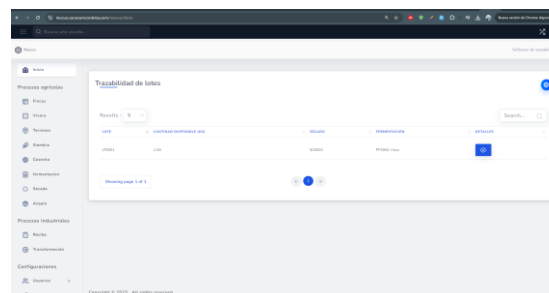


Fig.6. Sistema de trazabilidad
Fuentes: Elaboración propia.

El dispositivo IoT está equipado con cuatro termocuplas DS18B20 como se puede evidenciar en la Fig. 7, cada una de las cuales se puede asignar a un proceso de fermentación específico. Esto permite un monitoreo detallado y simultáneo de diferentes fermentaciones, asegurando que las variables críticas, como la temperatura, sean controladas de manera precisa en cada lote. La capacidad de asignar cada termocupla a una fermentación individual proporciona un nivel adicional de control y precisión en el proceso, lo que es fundamental para mantener la calidad del cacao.



Fig. 7. Termocuplas DS18B20
Fuentes: Elaboración Propia

El sensor DHT11 evidenciado en la Fig. 8, encargado de medir la temperatura ambiente y la humedad relativa, juega un papel crucial en el monitoreo de las condiciones ambientales durante el proceso de fermentación. Estos datos son fundamentales para garantizar que el entorno en el que se lleva a cabo la fermentación sea óptimo, permitiendo ajustar los parámetros del proceso según sea necesario para mantener la calidad del cacao.



Fig. 8. Sensor DHT11
Fuentes: Elaboración Propia

Los circuitos están montados en una placa PCB, lo que garantiza una disposición ordenada y segura de los componentes electrónicos. Adicionalmente, se incorporó un ventilador para mantener la temperatura adecuada de los componentes, previniendo el sobrecalentamiento y asegurando un funcionamiento continuo y estable. También se diseñó un chasis que facilita el acceso para el mantenimiento, permitiendo intervenciones rápidas y eficientes cuando sea necesario. Ver Fig. 9



Fig. 9. Circuito físico
Fuentes: Elaboración Propia

Para la comercialización se desarrolló una línea de tiempo interactiva utilizando Next.js, que permite brindar credibilidad y transparencia a todos los actores involucrados en la cadena de suministro. Esta herramienta ofrece una visualización clara y detallada del recorrido del cacao, desde la semilla hasta el producto final, asegurando que cada etapa del proceso sea completamente trazable. Al escanear el código QR, los usuarios pueden acceder a esta línea de tiempo, obteniendo una vista completa del historial del producto, lo que refuerza la confianza en la calidad y autenticidad del cacao. Ver Fig. 9.



Fig. 9. Línea de tiempo para la comercialización
Fuentes: Elaboración Propia

4.3. Fase 3: Pruebas en Territorio y Capacitación del Personal.

En esta fase, se implementó la solución tecnológica directamente en el territorio como se puede evidenciar en la Fig. 10, asegurando su integración en los procesos reales de la cadena agroindustrial del cacao. Las pruebas en campo permitieron validar la funcionalidad del sistema en un entorno operativo, identificando y ajustando cualquier desafío específico del terreno. A continuación, se muestran imágenes que capturan momentos clave de esta implementación, incluyendo la instalación del dispositivo IoT, el monitoreo de las condiciones de fermentación en tiempo real, y la capacitación práctica de los productores y personal involucrado. Estas imágenes no solo ilustran el despliegue de la tecnología, sino que también destacan el compromiso de la asociación integrasinu con la adopción de nuevas herramientas que mejoran la trazabilidad y la calidad del cacao producido.



Fig. 10: Instalación del dispositivo IoT y capacitaciones al personal. **Fuentes:** Elaboración Propia

5. DISCUSIÓN

El objetivo principal de esta investigación fue garantizar la trazabilidad y la seguridad alimentaria a lo largo de toda la cadena agroindustrial del cacao, desde la selección de la semilla hasta la comercialización del producto final. A través de la implementación de un sistema de información basado en tecnologías de la Industria 4.0 y IoT, se buscó proporcionar credibilidad y transparencia en cada etapa del proceso, asegurando que los productos cumplieran con los estándares de calidad y seguridad exigidos por los mercados internacionales.

Los resultados obtenidos demuestran que se logró cumplir con este objetivo. El sistema de trazabilidad implementado permitió un seguimiento preciso y en

tiempo real de las condiciones críticas durante la fermentación del cacao, un proceso clave que influye directamente en la calidad del producto final. Además, la utilización de una línea de tiempo interactiva para la comercialización brindó a los consumidores y otros stakeholders acceso a información detallada sobre el origen y el tratamiento del cacao, lo que refuerza la confianza en el producto.

La seguridad alimentaria se vio notablemente mejorada al poder monitorear y registrar condiciones como la temperatura y la humedad durante la fermentación. Esto aseguró que las variables críticas se mantuvieran dentro de los rangos óptimos, minimizando el riesgo de contaminaciones o desviaciones en la calidad del cacao.

La implementación de tecnologías IoT y 4.0 jugó un papel crucial en la consecución de los objetivos de este proyecto. La integración de dispositivos IoT, como la Raspberry Pi y los sensores DHT11 y DS18B20, permitió un monitoreo continuo y en tiempo real de las condiciones ambientales durante la fermentación del cacao.

Se realizó la fermentación para el genotipo el ICS-1, este clon no solo es valorado por su calidad sensorial, sino también por su potencial en el mercado internacional. La producción de cacao fino o de aroma, como el ICS-1, permite a los pequeños y medianos agricultores acceder a mejores precios y oportunidades de comercialización en el mercado global. Esto es crucial para el desarrollo sostenible de la agricultura en regiones productoras de cacao, como Perú y Colombia [19].

Es importante mencionar que la calidad del sabor y aroma del cacao ICS-1 está influenciada por el proceso de fermentación y secado. Estudios han demostrado que un tiempo adecuado de fermentación y un secado controlado pueden mejorar significativamente las propiedades sensoriales del cacao, aumentando la intensidad de sus notas aromáticas dándole la categoría de caca especial para chocolatería premium [20].

La siguiente Fig. 11 evidencia la temperatura del material monitoreada en esta fermentación realizada con un promedio de humedad relativa de 60% y de temperatura ambiente de 28.8

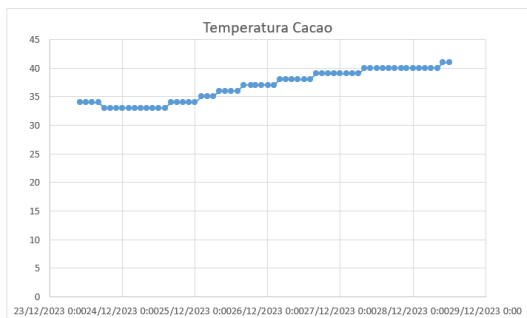


Fig. 11. Grafica de la temperatura del material ICS-1
Fuentes: Elaboración propia

Durante la implementación del sistema de trazabilidad y monitoreo en tiempo real, se encontraron desafíos significativos relacionados con la conectividad. Esta región suele tener un acceso limitado o inestable a redes de internet, lo que podría haber comprometido la recolección continua de datos críticos para el proceso de fermentación del cacao. Para mitigar estos desafíos, se integró una base de datos en SQLite en el dispositivo IoT, lo que permitió almacenar temporalmente los datos recolectados cuando la conexión a internet fallaba. Esta solución de respaldo garantizó que ninguna información se perdiera, asegurando la integridad del monitoreo y manteniendo el control del proceso

La implantación de tecnología 4.0 requiere una curva de aprendizaje que puede ser pronunciada, ya que muchos agricultores no están familiarizados con el uso de dispositivos electrónicos o con la interpretación de los datos generados. Además, la implementación exitosa de estas tecnologías requiere una capacitación continua para asegurar que los usuarios comprendan y puedan utilizar eficazmente las herramientas a su disposición.

Estas tecnologías garantizan que los procesos críticos se lleven a cabo dentro de unos parámetros óptimos. Como resultado, el cacao producido es de calidad superior, lo que mejora su percepción tanto a nivel nacional como internacional. Esta mejora de la calidad puede aumentar la competitividad de los productores en unos mercados en los que los consumidores valoran cada vez más la trazabilidad y la transparencia en la producción de alimentos [21].

Un control más preciso del proceso de fermentación no sólo reduce el riesgo de residuos, sino que también optimiza el uso de recursos, como la energía y el agua. Esto es crucial para minimizar el impacto medioambiental de la producción de cacao, haciendo que el proceso sea más sostenible a largo

plazo. Además, la capacidad de controlar y ajustar los procesos en tiempo real permite a los agricultores adoptar prácticas más responsables, contribuyendo a la sostenibilidad económica y ecológica [22].

6. CONCLUSIONES

Esta investigación ha contribuido significativamente al campo de la trazabilidad en la agroindustria del cacao, demostrando la importancia y el impacto positivo de las tecnologías 4.0 e IoT en la modernización de este sector. Al proporcionar un sistema que no solo mejora la calidad y seguridad del cacao, sino que también ofrece datos valiosos para la toma de decisiones futuras, este estudio establece un marco de referencia para futuras implementaciones tecnológicas en la agroindustria. La implementación de estas tecnologías tiene un gran potencial para impactar positivamente en las comunidades productoras de cacao. Al mejorar la calidad del producto y facilitar el acceso a mercados internacionales, estas tecnologías pueden aumentar los ingresos de los agricultores, contribuyendo al desarrollo económico y a la mejora de la calidad de vida en estas comunidades. Además, la adopción de prácticas sostenibles puede tener beneficios a largo plazo, tanto para el medio ambiente como para la estabilidad económica de los productores.

REFERENCIAS

- [1] K. N. Merizalde Santacruz, F. V. Benitez Luzuriaga, H. I. Tuza Jumbo, and L. P. Carmenate Fuentes, "Estrategias Competitivas para la Exportación de Mantequilla y Aceite de Cacao Ecuatoriano Hacia el Mercado de Alemania 2024," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 4, pp. 2581–2601, Aug. 2024, doi: 10.37811/cl_rcm.v8i4.12508.
- [2] S. Iván Picón Peralta, J. Patricia Ramírez Adarme, and D. Yamile Sandoval Villamizar, "Desafíos y alternativas para las exportaciones de cacao en el departamento de Santander años 2018-2022," 2024.
- [3] N. A. Granada Cano, J. C. Caicedo Eraso, and A. Duarte Castillo, "Caracterización fisicoquímica del aceite de cacao extraído a diferentes temperaturas de prensado. Resultados preliminares," *Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería - ACOFI*, Sep. 2023, pp. 1–7. doi: 10.26507/paper.2838.
- [4] Callejas-Jaramillo Luisa Fernanda and Álvarez-Urbe Karla C, "Trazabilidad en la

- cadena de suministro alimentaria: Un estudio bibliométrico,” 2020.
- [5] M. P. Guerra, “Tecnologías Limpias De Producción Agrícola: Aliadas En La Búsqueda De La Seguridad Alimentaria en el Valle de Aburrá,” Jan. 01, 2023, Corporacion Universitaria Lasallista. doi: 10.22507/PML.V18N1E.
 - [6] M. Ibrahim, C. Nangpiire, D. M. Winfred, and Y. Fataw, “The Effect of Blockchain Technology in Enhancing Ethical Sourcing and Supply Chain Transparency: Evidence from the Cocoa and Agricultural Sectors in Ghana,” *African Journal of Empirical Research*, vol. 5, no. 2, pp. 55–64, 2024, [Online]. Available: <https://ajernet.net>
 - [7] Jauberth Weyll Abijaude, Levy Santiago, P'ericles de Lima Sobreira, Omar Abdul Wahab, and Fab'iola Greve, *IoTcocoa – an IoT platform to assist gourmet cocoa production*. IEEE, 2019.
 - [8] J. Abijaude, P. Sobreira, I. Pinto, and F. Greve, “Combining REST and SNMP for HTTP traffic optimization: A case study on gourmet cocoa drying,” in *Proceedings - 2021 IEEE Latin-American Conference on Communications, LATINCOM 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/LATINCOM53176.2021.9647852.
 - [9] Salisu Musah, Tunç Durmuş Medeni, and Demet Soyly, “Assessment of Role of Innovative Technology through Blockchain Technology in Ghana's Cocoa Beans Food Supply Chains,” IEEE, 2020.
 - [10] S. Sahai, N. Singh, and P. Dayama, “Enabling Privacy and Traceability in Supply Chains using Blockchain and Zero Knowledge Proofs,” in *Proceedings - 2020 IEEE International Conference on Blockchain, Blockchain 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2020, pp. 134–143. doi: 10.1109/Blockchain50366.2020.00024.
 - [11] K. Umamaheswari, D. Antony Joseph Rajan, J. Ramasamy, S. K. Seenii, R. Meenakshi, and R. Thamizhamuthu, “SVM-Guided Dynamic Routing for Post-Harvest Quality Preservation in Smart Warehouses with IoT,” in *2024 3rd International Conference for Innovation in Technology, INOCON 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024. doi: 10.1109/INOCON60754.2024.10512097.
 - [12] D. Y. Cañar Serna, J. L. Sepúlveda Forero, E. Martínez Pachón, and L. P. Tibaduiza Castañeda, “Diseño de un sistema de trazabilidad como soporte al modelo productivo de cacao en la Cordillera Nariñense Colombiana,” *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*, vol. 9, no. 1, pp. 30–41, Apr. 2022, doi: 10.53287/ifok7070mq36r.
 - [13] Angel J. Oña Oña, Felipe Grijalva, Kevin Proaño, Byron Acuña, and Marcelo Garcia, “Classification of Fresh Cocoa Beans with Pulp Based on Computer Vision,” 2020.
 - [14] Gaofer Yin and Ainong Li, *DERIVATION OF HIGH SPATIO-TEMPORAL RESOLUTION LEAF AREA INDEX AND UNCERTAINTY MAPS BY COMBINING LAINET, CACAO AND GPR*. IEEE, 2018.
 - [15] N. A. Binghay, K. A. Quezon, V. J. Montero, M. Calamba, and P. E. Empas, “Object Detection Approach for Batch Detection of Cacao Bean Defects,” in *4th International Conference on Electrical, Communication and Computer Engineering, ICECCE 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ICECCE61019.2023.10442461.
 - [16] Juan Carlos Llanes Carvajal, Miller Sánchez Balaguera, Ronald Oswaldo Romero Gelves, and Omar Andrés Sánchez Monroy, “Huertas urbanas con agricultura de precisión en ambientes controlados”.
 - [17] T. F. DJAAFAR et al., “Physicochemical, microbiological, and sensory properties of probiotic chocolate bar Dad-13 made from cocoa beans fermented with *Lactiplantibacillus plantarum* HL-15 during storage,” *Food Science and Technology*, vol. 44, Apr. 2024, doi: 10.5327/fst.0001723.
 - [18] R. F. Schwan and A. E. Wheals, “The microbiology of cocoa fermentation and its role in chocolate quality,” *Crit Rev Food Sci Nutr*, vol. 44, no. 4, pp. 205–221, 2004, doi: 10.1080/10408690490464104.
 - [19] J. H. GUZMÁN BAUTISTA, “Producción de cacao ‘Theobroma cacao L.’ fino o de aroma peruano: Agronegocio sostenible,” *Alpha Centauri*, vol. 1, no. 1, pp. 49–55, Sep. 2020, doi: 10.47422/ac.v1i1.6.
 - [20] L. G. Rodriguez Silva, D. B. Sánchez López, M. R. Espinosa Carvajal, and R. A. Coronado Silva, “Caracterización microbiológica, sensorial y bromatológica de la fermentación de cacao en los genotipos CCN 51 E ICS 95,” *FAVE Sección Ciencias Agrarias*, vol. 22, p. e0016, Dec. 2023, doi: 10.14409/fa.2023.22.e0016.

- [21] J. Gomez, A. Fernandez, and M. Zúñiga. Monitoring of small crops for the measurement of environmental factors through the internet of things (IoT). In Technology Trends: 4th International Conference, CITT 2018, Babahoyo, Ecuador, August 29–31, 2018, Revised Selected Papers 4 (pp. 16-28). Springer International Publishing.
- [22] J. El internet de las cosas oportunidades y desafíos. Ingeniería E Innovación, 2017, 5(1)