



Artículo original / Original article

## Sistema inteligente basado en deep learning para la optimización de la fermentación del cacao

### Intelligent system based on deep learning for optimizing cocoa fermentation

Fredesvinda Jimenez-Peralta <sup>1\*</sup>; Gloria Elvira Pizango-Linares <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú

Recibido: 10/10/2022

Aceptado: 12/12/2022

Publicado: 25/01/2023

\*Autor de correspondencia: [fjimenezperalta@unsm.edu.pe](mailto:fjimenezperalta@unsm.edu.pe)

**Resumen:** Este estudio evaluó un sistema inteligente basado en Deep Learning para regular la temperatura durante la fermentación del cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. Se diseñó un fermentador eléctrico-mecánico con sensores de temperatura y pH, un PLC y un modelo de red neuronal para automatizar el proceso. Las pruebas comparativas mostraron que el sistema alcanzó un porcentaje de fermentación promedio de 77.5%, con valores homogéneos cercanos al 80%, considerado óptimo según estándares internacionales. Los análisis estadísticos, mediante la prueba U de Mann-Whitney, confirmaron una regulación superior frente al método tradicional. Este sistema mejora la eficiencia, trazabilidad y calidad sensorial del cacao, representando un avance tecnológico para la industria cacaotera.

**Palabras clave:** calidad sensorial; homogeneidad; inteligencia artificial; trazabilidad; sostenibilidad

**Abstract:** This study evaluated an intelligent system based on Deep Learning to regulate temperature during cacao fermentation at the Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. An electro-mechanical fermenter equipped with temperature and pH sensors, a PLC, and a neural network model was designed to automate the process. Comparative tests showed that the system achieved an average fermentation rate of 77.5%, with homogeneous values close to 80%, deemed optimal by international standards. Statistical analyses using the Mann-Whitney U test confirmed superior regulation compared to traditional methods. This system enhances efficiency, traceability, and sensory quality of cacao, representing a technological advancement for the cacao industry.

**Keywords:** sensory quality; homogeneity; artificial intelligence; traceability; sustainability

## 1. Introducción

Entre las etapas de poscosecha del cacao, el proceso de fermentación es una de las más importantes, pues determina la calidad final del producto (Horta-Tellez et al., 2019). Para obtener calidad en el resultado, las condiciones bioclimáticas producidas por los fermentadores son factores directos que influyen en el desarrollo adecuado del proceso físico y químico del cacao (Andrade-Almedia et al., 2019).

En Estados Unidos, Lee et al. (2019) sostuvieron que el control inoportuno de las condiciones de fermentación afectan la calidad química y las especies microbianas en los granos de cacao, esto se debe a que el proceso de fermentación se realiza en áreas no tecnificadas, así como el uso de fermentadores inadecuados que conducen a la alteración de la temperatura generando baja producción de cacao fino.

En Colombia, Machado Cuellar et al. (2018) afirmaron que las buenas prácticas de post cosecha del cacao para la obtención de granos de calidad se basan especialmente en la fermentación y secado, sin embargo, (Corzo Ruiz & Velazco Capacho, 2018) demostraron que gran proporción de los agricultores cacaoteros realizan estas prácticas mediante métodos tradicionales dificultando el control de la humedad y temperatura en la fermentación.

En el contexto peruano, Anzules Toala et al. (2019) señalaron que son pocos los estudios que se han realizado para contralar eficiente y ecológicamente la producción del cacao, a pesar de la repercusión de los problemas presentados en los procesos de cultivo, por lo que sugirieron concentrar investigaciones que proporcionen componentes estratégicos para el manejo integrado y control de factores como plagas, temperatura, humedad, etc.

En la región de San Martín los tipos de fermentadores más utilizados son las cajas de madera diseñados en tipo bote y escalera, cuyo uso depende de los hábitos del productor más que de la conveniencia para obtener calidad en los granos de cacao fermentados (Vílchez Vargas, 2016). Así, un reciente estudio realizado por Ruíz Muñoz (2019) en las instalaciones de la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda-Chazuta, lugar en el cual se ejecuta la presente investigación, reconoció el ineficiente proceso de fermentación del grano de cacao debido al desconocimiento e inapropiada determinación de temperaturas óptimas para obtener granos con buena calidad sensorial a partir de los fermentadores tradicionales.

Se realizó un estudio de campo donde identificamos la deficiente autorregulación del proceso de fermentación del grano de cacao debido a la inexistencia de manuales de actividades, modelos de estandarización de tiempo y procedimientos de remoción, que hacen que el personal de la Cooperativa desconozcan los protocolos de fermentación estandarizados a utilizarse (Vílchez Vargas, 2016), resultando en granos de cacao fermentados con calidad insuficiente para las demandas del mercado y con ello el exceso en la contratación de mano de obra (Quinde Rosales et al., 2019).

Asimismo, se reconoció el deficiente control del proceso de fermentación (temperatura, humedad y corriente de aire), siendo factores relacionados al desconocimiento de la variación de los parámetros básicos de fermentación de los granos de cacao (Márquez Romero et al., 2020), lo cual repercute en granos de cacao con una serie de defectos resultantes de una fermentación mal controlada y regulada (Lee et al., 2019).

A esto se añadió la deficiente infraestructura, servicios y tecnologías para el control del proceso de fermentación en la Cooperativa, pues suelen utilizar fibras vegetales u hojas de plátanos para cubrir el cacao y emplear cajones de madera. Como mencionado en líneas superiores, estos métodos tradicionales generan la poca frecuencia de remoción afectando la calidad del producto final.

Se identificó que todo esto ocasiona deficiencias en la regulación del proceso de fermentación y en la calidad sensorial y física del grano de cacao (Corzo Ruiz & Velazco Capacho, 2018),

ocasionando porcentaje bajos en rendimiento del cacao y baja calidad productiva en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda (Ruíz Muñoz, 2019).

La limitante de la investigación fue la complicación de logística para la adquisición y traslado internacional del equipamiento electromecánico necesario para ensamblar el sistema inteligente de control debido al confinamiento social producido por la pandemia Covid-19.

Bajo este panorama, se planteó construir un sistema inteligente de control usando tecnología de aprendizaje deep learning que permita automatizar la regulación del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda basado en los parámetros básicos de temperatura estandarizados que garanticen el alto rendimiento y productividad de granos de cacao de elevada calidad organoléptica.

## **2. Materiales y métodos**

### **Tipo y nivel de investigación**

El estudio fue de tipo aplicado, con un enfoque cuantitativo y nivel explicativo. Se empleó el método hipotético-deductivo, el cual permitió formular y contrastar hipótesis relacionadas con la regulación de la temperatura en el proceso de fermentación del cacao utilizando un sistema inteligente basado en Deep Learning.

### **Diseño experimental**

El diseño experimental consistió en un esquema con post-prueba y grupo control. Se trabajó con dos grupos: el grupo experimental, en el cual se aplicó el sistema inteligente de control basado en Deep Learning para la regulación de la temperatura; y el grupo control, donde se utilizó el método tradicional de fermentación. Ambos grupos siguieron un protocolo de fermentación de siete días bajo las mismas condiciones iniciales para garantizar comparabilidad.

### **Población y muestra**

La población del estudio estuvo conformada por granos de cacao del clon CCN51, recolectados en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. La muestra incluyó un total de 30 valores de porcentaje de fermentación, divididos equitativamente entre los dos grupos: 15 muestras para el grupo experimental y 15 muestras para el grupo control. Se aplicó un muestreo no probabilístico por conveniencia.

### **Sistema inteligente de control**

Se diseñó y construyó un dispositivo electromecánico equipado con sensores para medir la temperatura y el pH de los granos de cacao durante la fermentación. Estos sensores estuvieron conectados a un controlador lógico programable (PLC), encargado de capturar y registrar los datos en tiempo real. Los datos fueron almacenados en una base de datos estructurada en MySQL y procesados mediante un modelo de red neuronal desarrollado utilizando las librerías Keras y TensorFlow en Python. La red neuronal fue entrenada con datos del proceso para optimizar la regulación de la temperatura y garantizar una fermentación homogénea.

### **Análisis estadístico**

El análisis de los resultados se llevó a cabo utilizando la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, dado que los datos no presentaron una distribución normal, conforme a los resultados de la prueba de Shapiro-Wilk. Se compararon los porcentajes de fermentación obtenidos por el sistema inteligente y el método tradicional, utilizando un nivel de significancia del 5%. Este enfoque permitió validar la hipótesis de que el sistema inteligente de control basado en Deep Learning mejora significativamente la regulación de la temperatura y la calidad del proceso de fermentación.

### 3. Resultados y discusión

#### Protocolo de fermentación basado en parámetros estandarizados

Se desarrolló un protocolo para regular la fermentación del grano de cacao basado en parámetros estandarizados de temperatura y pH, adaptado a las condiciones locales de la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. Este protocolo integró resultados de estudios previos Ruíz Muñoz (2019); (Veira et al., 2019) y recomendaciones del equipo técnico de la cooperativa.

El protocolo incluyó un control automatizado de la temperatura entre 30 °C y 50 °C, con ajustes realizados a través del sistema inteligente basado en Deep Learning. Los sensores del fermentador eléctrico-mecánico monitorizaron las variables en tiempo real, y los datos fueron procesados para activar acciones correctivas, como la remoción del grano, cuando los valores superaban el rango óptimo. Este enfoque garantizó una fermentación homogénea y eficiente, adaptándose a las condiciones climáticas de la zona de Chazuta.

El flujo del protocolo formulado comprendió etapas de fermentación anaeróbica (48 horas) y aeróbica, con remociones periódicas de la masa cada 24 horas durante siete días, asegurando el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo de la obtención de granos de cacao, resaltando los parámetros evaluados, como temperatura y pH. Por su parte, el protocolo completo de fermentación con sus parámetros estandarizados se detalla en la Figura 2, que incluye las acciones automatizadas del sistema inteligente para garantizar un control efectivo.

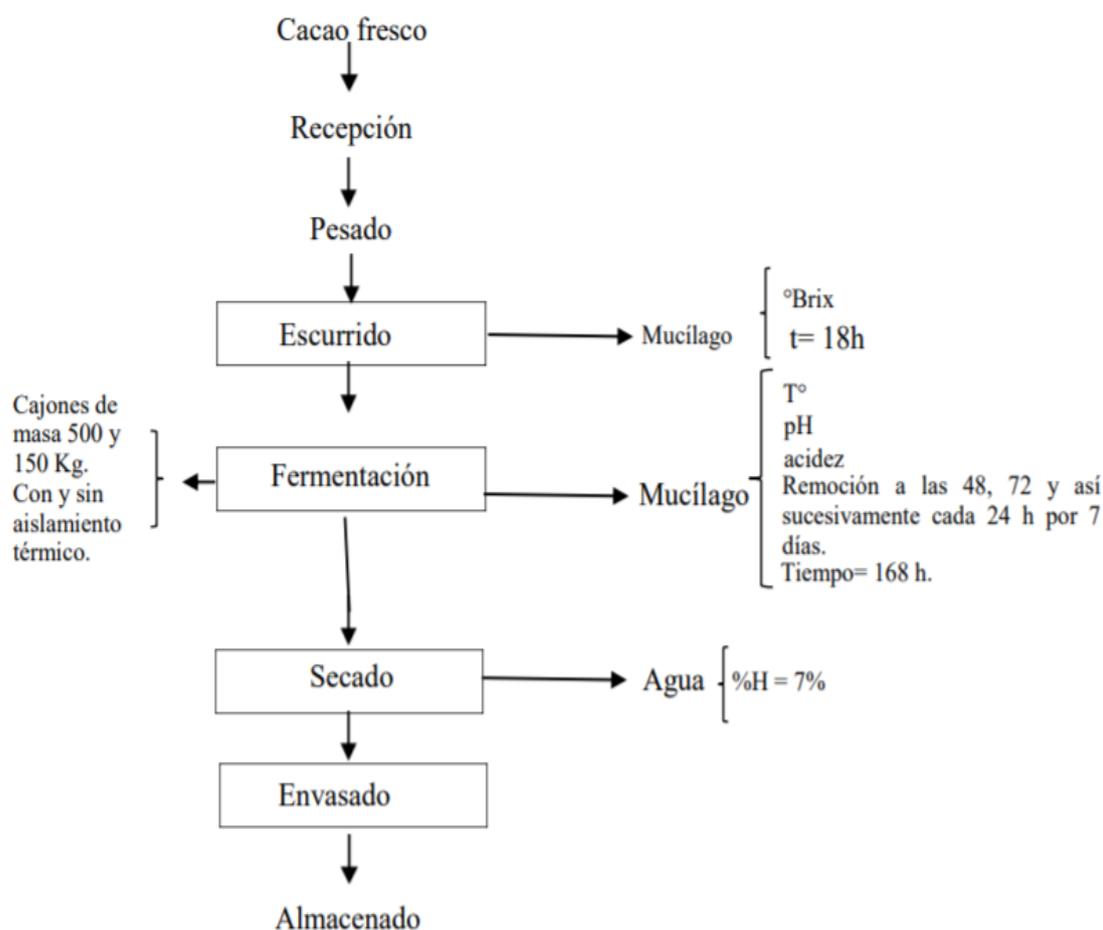
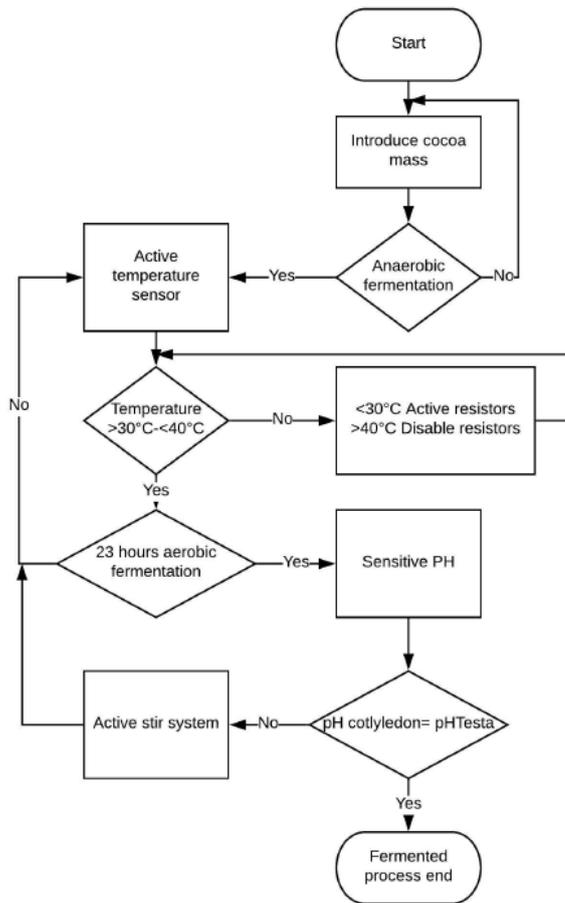


Figura 1. Diagrama de flujo para la obtención de grano de cacao (adaptado de Ruíz Muñoz, 2019).



**Figura 2.** Protocolo de fermentación formulado (adaptado de Veira et al., 2019).

Este protocolo fue fundamental para integrar los parámetros al sistema inteligente, optimizando el proceso de fermentación y asegurando la calidad sensorial y organoléptica del grano.

**Construcción del sistema inteligente de control basado en deep learning**

**Fase 1:** Identificación de requerimientos funcionales

En esta fase se definieron los requerimientos técnicos necesarios para diseñar el dispositivo fermentador, tomando como base las necesidades operativas de la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. Estos requerimientos incluyeron la capacidad de medir y regular parámetros críticos como la temperatura y el pH de la masa fermentante, realizar remociones automáticas, y permitir la fermentación tanto anaeróbica como aeróbica. También se consideró la necesidad de registrar datos en tiempo real para alimentar el sistema inteligente y garantizar un control preciso del proceso.

Estos requisitos fueron fundamentales para asegurar una fermentación homogénea y de alta calidad, cumpliendo con los estándares exigidos para la comercialización internacional de cacao. La tabla 1 destacando las principales condiciones que debía cumplir el dispositivo fermentador.

**Tabla 1.** Identificación de requerimientos funcionales del fermentador.

Ítems	Requisitos
1	Debe contener los granos de cacao en baba durante la fermentación y drenar el jugo los dos primeros días.
2	Debe permitir el drenado de jugos del cacao fresco.
3	Deber permitir realizar fermentación anaeróbica y aeróbica.

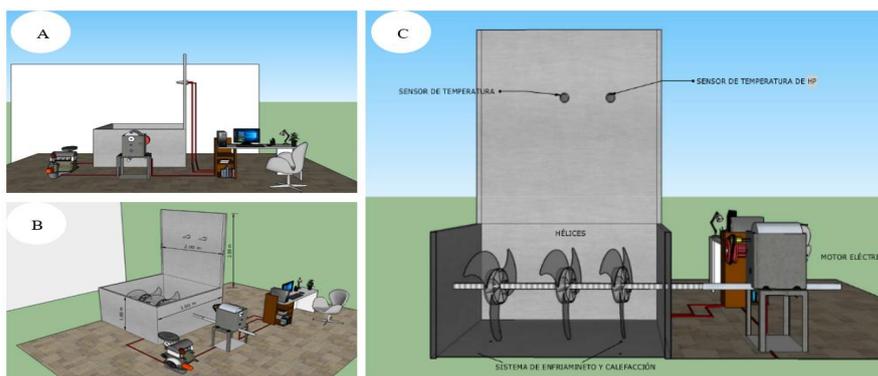
4	Debe permitir guardar los datos de pH y temperatura para que el algoritmo sea más preciso para regular los parámetros de temperatura.
5	Debe permitir remover los granos de cacao durante la fermentación sin causar daños.
6	Deber permitir la aireación de los granos de cacao durante la fermentación.
7	Debe mantener la temperatura durante la fermentación.
8	Debe permitir la homogenización de la masa de cacao fermentante.
9	Debe permitir la medición de la temperatura y pH de la masa fermentante.

## Fase 2: Diseño del bosquejo final

Basándose en los requerimientos funcionales definidos, se elaboraron diseños conceptuales en 2D, isométricos y 3D utilizando AutoCAD, con el objetivo de garantizar que el fermentador cumpliera con las especificaciones técnicas y operativas establecidas por los expertos de la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda.

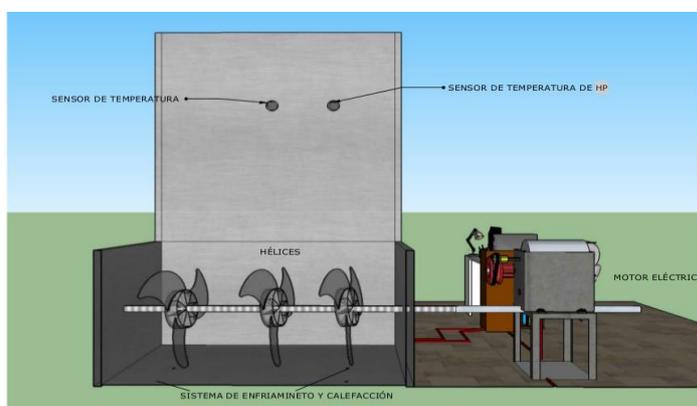
El diseño final seleccionado ofrecía una capacidad de 150 kg, integrando un sistema de giro automático para la remoción de la masa, sensores avanzados para la medición de temperatura y pH, y un aislamiento térmico eficiente. Estas características permitieron automatizar y optimizar el proceso de fermentación.

En la Figura 3, se presenta el diseño real del fermentador correspondiente al dibujo conceptual del seleccionado, donde se observa el modelo en tres vistas: A representa el diseño en 2D, B el diseño isométrico y C el diseño en 3D.



**Figura 3.** Diseño real del fermentador según el dibujo conceptual del seleccionado

Tras una valoración técnica y práctica, el equipo decidió que este diseño era el más adecuado para satisfacer las necesidades del proceso de fermentación del cacao. Posteriormente, se realizaron ajustes menores para optimizar el rendimiento y garantizar un proceso de fermentación homogéneo y eficiente. El diseño final seleccionado, con las modificaciones pertinentes, se presenta en la Figura 4.



**Figura 4.** Diseño final del fermentador ajustado para el proceso de fermentación

Para seleccionar el diseño final del fermentador, se realizó un diagnóstico detallado del proceso de fermentación del grano de cacao en baba en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. Este diagnóstico permitió identificar las características principales del método tradicional utilizado en la cooperativa. Actualmente, el fermentado se realiza en baterías de cajones dispuestas de forma lineal. Cada batería consta de cajones grandes con capacidad para 500 kg y cajones más pequeños de 150 kg. Estos cajones están contruidos de madera con un espesor de 2 pulgadas y recubiertos con tecnopor, lo que asegura el aislamiento térmico necesario para mantener la temperatura ideal durante la fermentación.

Un aspecto clave del proceso identificado fue el drenado de jugo de cacao, que ocurre durante las primeras 45 horas en la etapa de fermentación anaeróbica. Para facilitar este drenado, los cajones están diseñados con ranuras y orificios en la base. Además, cuentan con agujeros laterales distribuidos cada 10 cm que permiten insertar termómetros digitales para medir la temperatura en tres niveles: inferior, medio y superior. Este monitoreo manual se complementa con una bitácora que registra las curvas de temperatura ideales, lo que ayuda a realizar ajustes durante la fermentación según sea necesario.

El método empleado incluye remociones manuales de la masa de cacao, con una primera remoción a las 48 horas y posteriores remociones cada 24 horas hasta completar los siete días de fermentación. Estas remociones tienen como objetivo homogenizar la fermentación y asegurar la calidad organoléptica requerida para la comercialización del cacao. Este diagnóstico permitió identificar limitaciones en el proceso tradicional, como la dependencia de ajustes manuales y la falta de uniformidad en la regulación térmica y de pH.

Con base en estas observaciones, se definieron los criterios necesarios para el diseño del fermentador inteligente. Se priorizó una capacidad de 150 kg, un sistema de aislamiento térmico eficiente, sensores integrados de temperatura y pH para monitoreo automatizado, y un sistema de giro automático que garantizara una remoción uniforme de la masa fermentante. Estos elementos no solo mejoran la eficiencia del proceso, sino que también permiten la integración de algoritmos de Deep Learning para optimizar la regulación y control del fermentador. De esta manera, el diseño final seleccionado representó una solución tecnológica avanzada para superar las limitaciones del método tradicional y garantizar un proceso de fermentación homogéneo y de alta calidad.

### **Fase 3: Ensamblaje del dispositivo fermentador**

El ensamblaje del fermentador se desarrolló en tres etapas principales:

**Estructura mecánica:** Se construyó la base del fermentador utilizando acero inoxidable para garantizar resistencia y durabilidad. Este proceso incluyó la instalación de un sistema de rotación para facilitar la remoción automática de la masa y una tapa aislante para mantener las condiciones térmicas ideales. La estructura final fue diseñada para soportar la capacidad de 150 kg sin comprometer su funcionalidad.

**Sistema de aireación:** Se instaló un sistema de aireación controlado por un panel HMI (Human-Machine Interface), que permite regular el enfriamiento y el calentamiento durante el proceso de fermentación. Este sistema garantizó una distribución uniforme de la temperatura en toda la masa fermentante.

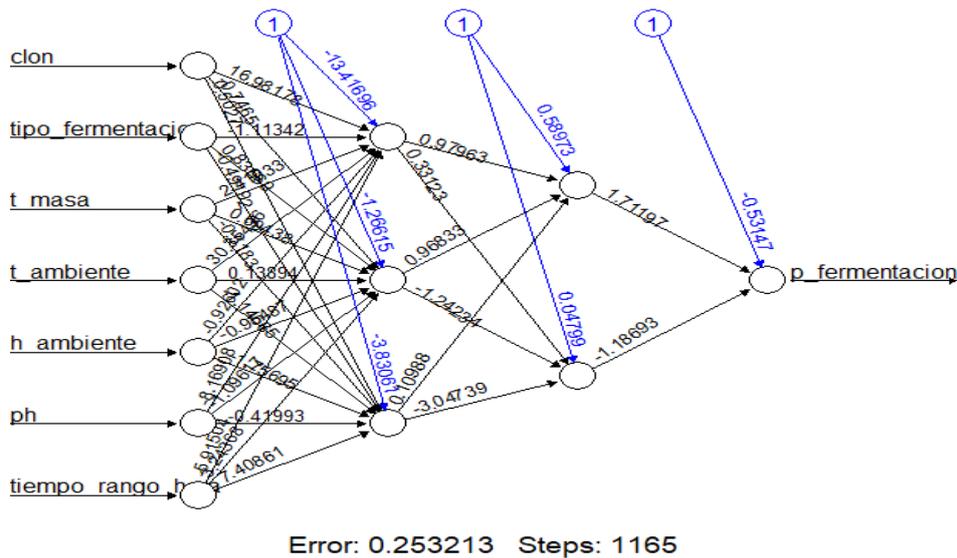
**Sensores y PLC:** Se integraron sensores de temperatura y pH estratégicamente ubicados en el fermentador, conectados a un controlador lógico programable (PLC Siemens S7 1200). Este sistema permitió el monitoreo en tiempo real y la regulación automática de las condiciones de fermentación.

### **Fase 4: Desarrollo del sistema inteligente**

Con el fermentador ensamblado, se procedió a integrar el sistema inteligente de control basado en Deep Learning. Este proceso incluyó:

Base de datos y software web: Se creó una base de datos en MySQL para registrar los datos recolectados por los sensores y un software web para monitorear los parámetros en tiempo real.

Modelo de Deep Learning: Utilizando librerías Keras y TensorFlow, se entrenó una red neuronal diseñada para regular la temperatura y el pH de manera autónoma. El modelo alcanzó un error de 0.25, lo que permitió su integración efectiva al sistema. La red neuronal se ilustra en la Figura 5.



**Figura 5.** Red neuronal de entrenamiento de modelo

*Nota.* Red neuronal de 1 capa de entrada, 2 capas ocultas y una capa de salida. Aplicó el sistema de algoritmo = "rprop+" => Algoritmo de backpropagation. Se entrenó en lenguaje Python (interfaz pycharm).

Integración final: El sistema inteligente fue integrado completamente al fermentador, automatizando la regulación de las variables críticas durante la fermentación. Esto permitió garantizar un proceso eficiente y homogéneo, optimizando la calidad del grano de cacao.

### Evaluación de la influencia del sistema inteligente de control basado en deep learning en la regulación de la temperatura

La validación de la hipótesis de que el sistema inteligente de control basado en Deep Learning regula la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. se llevó a cabo en dos fases: instalación y pruebas del software, y pruebas funcionales y análisis técnico. Este proceso involucró tanto observación técnica por expertos como análisis estadísticos para evaluar la eficacia del sistema.

#### Fase 5: Instalación y pruebas del software

El software del sistema inteligente fue desarrollado y codificado en lenguaje C, permitiendo la conexión entre los canales seriales del PLC y la microcomputadora. Este software central almacenó y analizó datos del proceso de fermentación en tiempo real, ajustándolos al protocolo predefinido. Además, integró un panel de control que mostraba los datos en tiempo real y permitía la operación manual del dispositivo a través de botones que activaban o interrumpían el flujo de energía eléctrica.

Los expertos en producción de cacao validaron la funcionalidad del fermentador mediante observación técnica profesional, confirmando que cumplía al 100% con los criterios determinantes definidos previamente. Este resultado demostró la eficacia del sistema inteligente para regular la temperatura y garantizar el cumplimiento de los estándares requeridos. La Figura 6 muestra el panel de control del fermentador, un componente clave en esta fase.



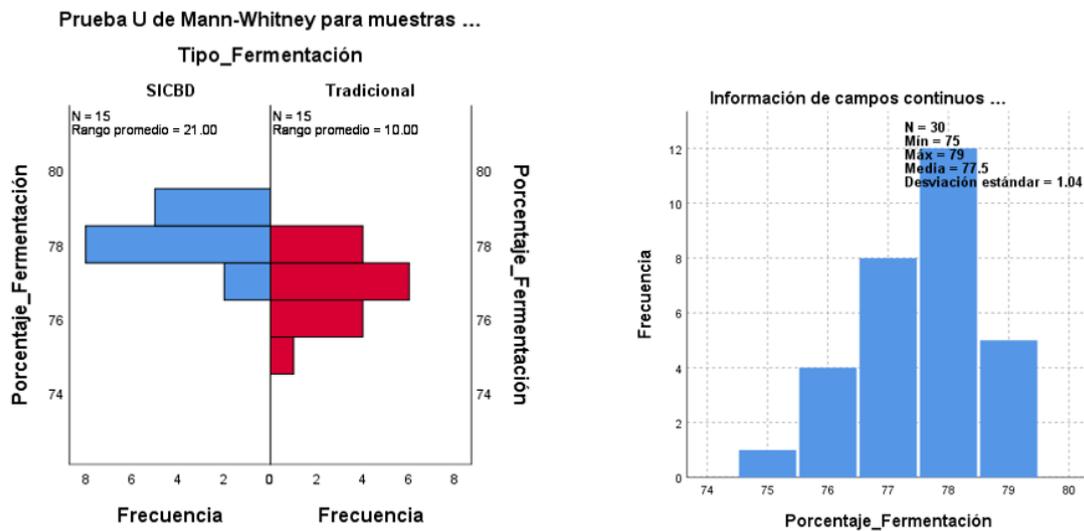
**Figura 6.** Panel de control del fermentador

**Fase 6:** Pruebas funcionales e informes técnicos

La última fase consistió en pruebas funcionales que compararon la trazabilidad del proceso de fermentación utilizando métodos tradicionales y el sistema inteligente de control basado en Deep Learning (SICBD). Los resultados del séptimo día mostraron que el porcentaje de fermentación fue consistentemente superior con el SICBD, alcanzando valores más homogéneos y cercanos al porcentaje óptimo del 80% requerido por la cooperativa.

Los análisis estadísticos se realizaron utilizando la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, aplicada a datos de trazabilidad del tipo de clon CCN51. Debido a que los datos no presentaron una distribución normal ( $p < 0.05$ , prueba de Shapiro-Wilk), este método permitió validar la hipótesis de investigación. El rango promedio de fermentación para el SICBD fue de 21, mientras que el método tradicional obtuvo un valor de 10.

Finalmente, se observó un rango de fermentación entre 75% y 79%, con una media de 77.5% y una desviación estándar de 1.04. Estos valores reflejan la eficacia del sistema inteligente para lograr una homogenización adecuada y cumplir con los estándares internacionales de calidad. La Figura 7 muestra los gráficos estadísticos de la prueba U de Mann-Whitney, que ilustran la significancia de los resultados obtenidos.



**Figura 7.** Gráficos estadísticos de la prueba U de Mann-Whitney

Los resultados de las pruebas y análisis técnicos confirmaron que el sistema inteligente basado en Deep Learning regula de manera eficaz la temperatura del proceso de fermentación del cacao. Este sistema no solo mejora la homogenización del proceso, sino que también garantiza una calidad sensorial y organoléptica superior, cumpliendo con los requisitos del mercado

internacional y posicionándose como una solución tecnológica innovadora para la industria cacaotera.

El proceso de fermentación del grano de cacao es de suma importancia para lograr calidad final del producto, tanto sensorial como organoléptica. En esta etapa, los fermentadores son factores determinantes de la sucesión de micro organismos, pues los materiales con los que se encuentren construidos pueden afectar la calidad de los granos.

En este sentido, Vílchez Vargas (2016) afirma que los agricultores en la región de San Martín utilizan métodos de fermentación tradicionales cuya utilidad depende de sus hábitos más que de la conveniencia por obtener calidad. Es así que, mediante la presente investigación se desarrolló un sistema inteligente de control basado en tecnología deep learning para controlar y regular el proceso de fermentación de forma automatizada.

Los resultados demuestran la formulación de un protocolo de parámetros básicos de fermentación estandarizados según temperatura y pH masa, dicho diseño se planteó a partir de la investigación de Ruíz Muñoz (2019); Veira et al. (2019). Se discute frente a estos autores que las condiciones climáticas propensas en el ámbito de la experimentación son causales que estos presenten diferentes propuestas de flujo; sin embargo, se coinciden con la utilidad de los parámetros mencionados, ya que son pertinentes para el monitoreo y que mediante su verificación se puedan homogenizar la fermentación del cacao.

En cuanto al diseño de construcción del dispositivo fermentador se coincide con los estudios de Veira et al. (2019); Parra et al. (2019), ya que al igual que estos, el dispositivo tuvo partes electrónicas y mecánicas, además la forma de un tambor giratorio con paletas incorporadas que remueven el grano de cacao cuando se activan los sensores de temperatura. En el caso de Veira et al. (2019), se utilizó un controlador programado en PLC que establece las etapas de fermentación y secado; este último proceso difiere con el objetivo planteado, ya que no se tomó en consideración.

La solución de Veira et al. (2019) reduce la duración del proceso de fermentación en un 66% en comparación con métodos tradicionales, hecho que también se relaciona con los resultados del presente estudio; ya que a partir del cumplimiento de criterios determinantes el sistema inteligente de control fue eficaz, satisfaciendo los estándares de calidad de fermentación con la homogenización final del cacao en promedio del 77% muy cercano al 80% (valor óptimo).

A diferente del sistema desarrollo por Parra et al. (2019), en el cual el fermentador fue programado para remover la masa del cacao cada 2 hrs, en los resultados del presente se muestra que la remoción de los granos se efectúa al validar el valor de la temperatura masa para accionar o enviar señales eléctricos de movimiento. Se puede considera que la definición del protocolo brinda soporte a la tecnología desarrollada, afirmando que es necesario que los sistemas de automatización cuenten con un diseño robusto teórico-práctico.

Un punto resaltante de los resultados es la condición de asegurar la fermentación anaeróbica y aeróbica de los granos de cacao durante su proceso, pues mediante las remociones a tiempo es posible que se generen la transformación de azúcares y el incremento de concentración de ácido acético en los granos. Con ello, se asegura las características organolépticas y la calidad sensorial del cacao, indicadores sustanciales para la comercialización en el mercado nacional e internacional.

Finalmente, manifestamos que la tecnificación de los procesos en el sector agrícola está tomando mayor valor e incidencia y con la investigación llevado a cabo, hacemos un gran aporte a la comunidad científica ya que integramos inteligencia artificial bajo un modelo de deep learning que controle y regule automáticamente el proceso de fermentación del grano de cacao en fermentadores de sistema eléctrico-metal.

## 4. Conclusiones

La implementación del sistema inteligente de control basado en Deep Learning en el proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. demostró ser altamente eficaz para regular y mantener las condiciones óptimas de temperatura y pH. Los resultados obtenidos indicaron que el sistema no solo alcanzó una fermentación más homogénea y cercana al porcentaje óptimo requerido (80%), sino que también superó consistentemente los métodos tradicionales en diferentes tipos de clon de cacao. Esto se logró gracias a la automatización del proceso, que permitió realizar ajustes en tiempo real y mantener un control preciso de las variables críticas, garantizando una calidad sensorial y organoléptica que cumple con los estándares internacionales para la comercialización del cacao.

El análisis estadístico confirmó que el sistema inteligente de control presenta una diferencia significativa en la regulación del proceso de fermentación en comparación con el método tradicional, con un margen de error del 5%. La incorporación de esta tecnología no solo optimiza la eficiencia del proceso, sino que también representa una innovación significativa para la industria cacaotera, facilitando el cumplimiento de los estándares de calidad exigidos a nivel internacional. Estos resultados sugieren que la adopción de sistemas basados en Deep Learning podría ser clave para mejorar la producción y comercialización del cacao, ofreciendo un enfoque más robusto y sostenible para los productores.

## Financiamiento

Ninguno.

## Conflicto de intereses

Las autoras declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## Contribución de autores

F. Jimenez-Peralta: Definió y conceptualizó el tema de investigación, diseñó la metodología, desarrolló y aplicó los instrumentos de recolección de datos, y llevó a cabo el trabajo de campo. Asimismo, redactó el primer borrador del artículo científico y se encargó de su revisión, edición final y aprobación del manuscrito para su publicación.

G. E. Pizango-Linares: Participó en la definición y conceptualización del tema de investigación, contribuyó al diseño de la metodología, colaboró en el desarrollo y aplicación de los instrumentos de recolección de datos, y apoyó en el trabajo de campo. También participó en la redacción, revisión y aprobación final del manuscrito para su publicación.

## Referencias bibliográficas

- Andrade-Almedia, J., Rivera-García, J., Chire-Fajardo, G. C., & Ureña-Peralta, M. O. (2019). Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao (*Theobroma cacao* L.) de Ecuador y Perú. *Enfoque UTE*, 10(4), 1-12. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v10n4.462>
- Anicama Buleje, R., & Vega Palomino, H. M. (2019). *Sistema de Inteligencia de Negocios para mejorar la calidad de las decisiones empresariales en empresa Apu Kuntur S.C.R.L.* 2019 [Universidad Tecnológica de los Andes]. <https://hdl.handle.net/20.500.14512/323>
- Anzules Toala, V., Borjas Ventura, R., Alvarado Huamán, L., Castro-Cepero, V., & Julca-Otiniano, A. (2019). Cultural, biological and chemical control of *Moniliophthora roreri* and *Phytophthora* spp IN *Theobroma cacao* 'CCN-51.' *Scientia Agropecuaria*, 10(4), 511-520.

- <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.04.08>
- Corzo Ruiz, C. L., & Velazco Capacho, D. A. (2018). Control automático de microclima en invernadero para secado eficiente de granos de cacao. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(32), 104–108. <https://doi.org/10.24054/16927257.v32.n32.2018.3033>
- González Bernal, M. J. (2022). *Uso de herramientas de Business Intelligence para analizar las ventas de tomate, chile y pepino de una empresa productora de México* [Universidad de Córdoba]. <http://hdl.handle.net/10396/22603>
- Horta-Tellez, H. B., García-Muñoz, M. C., Ceron-Salazar, I. X., & Sandoval-Aldana, A. P. (2019). Evaluation of the fermentation process and final quality of five cacao clones from the department of Huila, Colombia. *DYNA*, 86(210), 233–239. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.75814>
- Lee, A. H., Neilson, A. P., O’Keefe, S. F., Ogejo, J. A., Huang, H., Ponder, M., Chu, H. S. S., Jin, Q., Pilot, G., & Stewart, A. C. (2019). A laboratory-scale model cocoa fermentation using dried, unfermented beans and artificial pulp can simulate the microbial and chemical changes of on-farm cocoa fermentation. *European Food Research and Technology*, 245(2), 511–519. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3171-8>
- Machado Cuellar, L., Ordoñez Espinosa, C. M., Angel Sanchez, K., Guaca Cruz, L., & Suárez Salazar, J. C. (2018). Organoleptic quality assessment of Theobroma cacao L. in cocoa farms in northern Huila, Colombia. *Acta Agronómica*, 67(1), 46–52. <https://doi.org/10.15446/acag.v67n1.66572>
- Márquez Romero, F. R., Altamirano Sacse, J., Cabrera Márquez, S., & Puma Leiva, L. (2020). Efecto de cultivar, presecado y método de fermentación en el porcentaje y tiempo de fermentación de cacao en La Convención - Cusco. *Revista Peruana de Innovación Agraria*, 1(1), 10–22.
- Núñez Cartolin, C. A. (2022). *Business Intelligence y su impacto en la productividad del proceso de toma de decisiones de la alta gerencia en la empresa Newocean Technology S. A. C.* [Universidad Privada del Norte]. <https://hdl.handle.net/11537/30383>
- Quinde Rosales, V., Bucaram Leverone, R., Bucaram Leverone, M., & Bueno Quiñonez, M. (2019). Factores productivos de la producción de cacao nacional de la Provincia del Guayas. *Espirales Revista Multidisciplinaria de Investigación Científica*, 4(31), 104–116. <https://doi.org/10.31876/er.v3i31.720>
- Ruíz Muñoz, S. R. (2019). *Efecto de la temperatura de fermentación sobre la calidad física y organoléptica del grano de cacao (Theobroma cacao L.)*. Universidad Nacional de San Martín.
- Sanchez Acevedo, M. S. (2022). *Inteligencia de Negocios para la agilización en la toma de decisiones de la gestión Comercial en la empresa Open World Corporation S.A.C.* [Universidad Nacional de Trujillo]. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/19706>
- Veira, J., Cuaycuan, E., & Espana, N. (2019). Automatic fermentation and drying cocoa process. 2019 *IEEE 4th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CCAC.2019.8921378>
- Vílchez Vargas, N. (2016). *Efecto del material del fermentador, en el grado de fermentación de granos de cacao (Theobroma cacao L, Clon: CCN - 51)*. Universidad Nacional de San Martín.