



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-Compartirigual 2.5 Perú](http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/).

Vea una copia de esta licencia en <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E
INFORMÁTICA



Sistema inteligente de control basado en deep learning para la regulación de la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda.

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero de Sistemas e Informática.

AUTORES:

Br. Fredesvinda Jimenez Peralta
Br. Gloria Elvira Pizango Linares

ASESOR:

Ing. Dr. Miguel Angel Valles Coral

Tarapoto – Perú

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
ESCUELA PROFESIONAL DE
INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA



**Sistema inteligente de control basado en deep learning para la regulación de
la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la
Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda.**

AUTORAS:

Fredesvinda Jimenez Peralta

Gloria Elvira Pizango Linares

Sustentada y aprobada el 14 de enero del 2022, ante el honorable jurado:

.....
Ing. Carlos Armando Ríos López

Presidente

.....
Ing. Mtro. John Antony Ruíz Cueva

Secretario

.....
Ing. Mg. Alberto Alva Arévalo

Vocal

Declaración de autenticidad

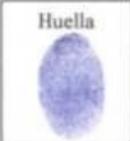
Nosotras, Fredesvinda Jiménez Peralta y Gloria Elvira Pizango Linares, identificadas con DNI N° 72177310 y DNI N° 47160589 de la Escuela Profesional de Ingeniería de Sistemas e Informática, autor de la tesis que lleva como título: “Sistema inteligente de control basado en deep learning para la regulación de la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Allima Cacao Ltda”

Declaramos que:

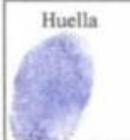
El tema de tesis es auténtico, siendo resultado de mi trabajo personal, que no se ha sido copiado, que no se ha utilizado ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones diversas, sacadas de cualquier tesis, obra, artículo, memoria, etc., (en versión digital o impresa), sin mencionar de forma clara y exacta su origen o autor, tanto en el cuerpo del texto, figuras, cuadros, tablas u otros que tengan derecho de autor.

En ese sentido, somos conscientes de que el hecho de no respetar los derechos de autor y hacer plagio, son objeto de sanciones universitarios y/o legales.

Tarapoto, 08 de setiembre del 2021.

Huella


Fredesvinda Jimenez Peralta
DNI N° 72177310

Huella


Gloria Elvira Pizango Linares
DNI N° 47160589

Formato de autorización NO EXCLUSIVA para la publicación de trabajos de investigación, conducentes a optar grados académicos y títulos profesionales en el Repositorio Digital de Tesis

1. Datos del autor:

| | | | |
|----------------------|-------------------------------|-----------|-----------|
| Apellidos y nombres: | PIZANGO LINARÉS GLORIA ELVIRA | | |
| Código de alumno : | 097163 | Teléfono: | 945747670 |
| Correo electrónico : | gpizango@unsm.edu.pe | DNI: | 47160589 |

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

2. Datos Académicos

| | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Facultad de: | Ingeniería de sistemas e Informática |
| Escuela Profesional de: | Ingeniería de sistemas e Informática |

3. Tipo de trabajo de investigación

| | | | |
|------------------------------------|-----|--------------------------|-----|
| Tesis | (X) | Trabajo de investigación | () |
| Trabajo de suficiencia profesional | () | | |

4. Datos del Trabajo de investigación

| | |
|---------------------|---|
| Título : | Sistema INTELIGENTE de control Basado en Deep Learning para la Regulación de la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Ailpma Cacao LTDA. |
| Año de publicación: | |

5. Tipo de Acceso al documento

| | | | |
|-----------------------|-----|---------|-----|
| Acceso público * | (X) | Embargo | () |
| Acceso restringido ** | () | | |

Si el autor elige el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, una licencia **No Exclusiva**, para publicar, conservar y sin modificar su contenido, pueda convertirla a cualquier formato de fichero, medio o soporte, siempre con fines de seguridad, preservación y difusión en el Repositorio de Tesis Digital. Respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:

| |
|--|
| |
| |

6. Originalidad del archivo digital.

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.

7. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia *Creative Commons*, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>

El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Digital de Tesis, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el inciso 12.2, del artículo 12° del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI “**Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Repositorio Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA**”.




Firma del Autor

8. Para ser llenado en el Repositorio Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto de la UNSM - T.

Fecha de recepción del documento.

04 / 02 / 2022


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
Repositorio Digital de Ciencia, Tecnología
e Innovación de Acceso Abierto – UNSM.

Ing. Grecia Vanessa Fachin Ruíz
Responsable

* **Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

** **Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.

Formato de autorización NO EXCLUSIVA para la publicación de trabajos de investigación, conducentes a optar grados académicos y títulos profesionales en el Repositorio Digital de Tesis

1. Datos del autor:

| | | | |
|----------------------|-------------------------------|-----------|-----------|
| Apellidos y nombres: | Jismoney Peralta Fradesorimdo | | |
| Código de alumno : | 0971548 | Teléfono: | 917698343 |
| Correo electrónico : | Fruipe@gmail.com | DNI: | 72177310 |

(En caso haya más autores, llenar un formulario por autor)

2. Datos Académicos

| | |
|-------------------------|--------------------------------------|
| Facultad de: | Ingeniería de Sistemas e Informática |
| Escuela Profesional de: | Ingeniería de Sistemas e Informática |

3. Tipo de trabajo de investigación

| | | | |
|------------------------------------|-----|--------------------------|-----|
| Tesis | (X) | Trabajo de investigación | () |
| Trabajo de suficiencia profesional | () | | |

4. Datos del Trabajo de investigación

| | |
|---------------------|--|
| Título : | Sistema Inteligente de control basado en Deep Learning para la regulación de la temperatura del proceso de fermentación del grano de cañote en la cooperativa Agraria Allinca cacaco LTDA. |
| Año de publicación: | |

5. Tipo de Acceso al documento

| | | | |
|-----------------------|-----|---------|-----|
| Acceso público * | (X) | Embargo | () |
| Acceso restringido ** | () | | |

Si el autor elige el tipo de acceso abierto o público, otorga a la Universidad Nacional de San Martín – Tarapoto, una licencia **No Exclusiva**, para publicar, conservar y sin modificar su contenido, pueda convertirla a cualquier formato de fichero, medio o soporte, siempre con fines de seguridad, preservación y difusión en el Repositorio de Tesis Digital. Respetando siempre los Derechos de Autor y Propiedad Intelectual de acuerdo y en el Marco de la Ley 822.

En caso que el autor elija la segunda opción, es necesario y obligatorio que indique el sustento correspondiente:

| |
|--|
| |
| |

6. Originalidad del archivo digital.

Por el presente dejo constancia que el archivo digital que entrego a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, como parte del proceso conducente a obtener el título profesional o grado académico, es la versión final del trabajo de investigación sustentado y aprobado por el Jurado.

7. Otorgamiento de una licencia *CREATIVE COMMONS*

Para investigaciones que son de acceso abierto se les otorgó una licencia *Creative Commons*, con la finalidad de que cualquier usuario pueda acceder a la obra, bajo los términos que dicha licencia implica

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>

El autor, por medio de este documento, autoriza a la Universidad Nacional de San Martín - Tarapoto, publicar su trabajo de investigación en formato digital en el Repositorio Digital de Tesis, al cual se podrá acceder, preservar y difundir de forma libre y gratuita, de manera íntegra a todo el documento.

Según el inciso 12.2, del artículo 12° del Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales - RENATI “**Las universidades, instituciones y escuelas de educación superior tienen como obligación registrar todos los trabajos de investigación y proyectos, incluyendo los metadatos en sus repositorios institucionales precisando si son de acceso abierto o restringido, los cuales serán posteriormente recolectados por el Repositorio Digital RENATI, a través del Repositorio ALICIA**”.


.....
Firma del Autor



8. Para ser llenado en el Repositorio Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto de la UNSM - T.

Fecha de recepción del documento.

04 / 02 / 2022



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN
Repositorio Digital de Ciencia, Tecnología
e Innovación de Acceso Abierto – UNSM.
.....
Ing. Grecia Vanessa Fachin Ruíz
Responsable

***Acceso abierto:** uso lícito que confiere un titular de derechos de propiedad intelectual a cualquier persona, para que pueda acceder de manera inmediata y gratuita a una obra, datos procesados o estadísticas de monitoreo, sin necesidad de registro, suscripción, ni pago, estando autorizada a leerla, descargarla, reproducirla, distribuirla, imprimirla, buscarla y enlazar textos completos (Reglamento de la Ley No 30035).

** **Acceso restringido:** el documento no se visualizará en el Repositorio.

Dedicatoria

Las autoras dedicamos este proyecto de investigación primeramente a Dios, a nuestros padres y a nuestras hijas que son la fuente principal para nunca rendirnos e ir creciendo profesionalmente y ser un ejemplo para ellas.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a la Cooperativa Agraria ALLIMA CACAO por brindarnos todas las facilidades para la realización de este proyecto de investigación.

Al Ing. Dr. Miguel Angel Valles Coral, por su continuo asesoramiento durante el desarrollo de la investigación.

A nuestra familia y amigos quienes han sido parte fundamental para la realización de este proyecto.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| Dedicatoria..... | 6 |
| Agradecimientos..... | 7 |
| Índice general | 8 |
| Índice de tablas | 9 |
| Índice de figuras | 10 |
| Resumen | 11 |
| Abstract..... | 12 |
| Introducción..... | 13 |
| CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| 1.1. Antecedentes de la investigación | 16 |
| 1.2. Bases teóricas..... | 17 |
| 1.3. Definición de términos básicos | 24 |
| CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS | 26 |
| 2.1. Tipo y nivel de investigación | 26 |
| 2.2. Diseño de investigación | 26 |
| 2.3. Población y muestra | 27 |
| 2.4. Técnicas e instrumento de recolección de datos | 27 |
| 2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos | 28 |
| 2.6. Metodología | 28 |
| CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 30 |
| 3.1. Resultados | 30 |
| 3.2. Discusión..... | 49 |
| CONCLUSIONES..... | 51 |
| RECOMENDACIONES | 52 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 53 |
| ANEXOS | 59 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Requerimientos funcionales para la construcción del fermentador | 33 |
| Tabla 2. Criterios determinantes para la elección del fermentador | 41 |
| Tabla 3. Pruebas funcionales de trazabilidad | 47 |
| Tabla 4. Pruebas de normalidad..... | 48 |
| Tabla 5. Resumen de contrastes de hipótesis..... | 48 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Parámetros básicos de fermentación | 23 |
| Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención de grano de cacao..... | 30 |
| Figura 3. Diagrama de flujo de la etapa de fermentación | 31 |
| Figura 4. Protocolo de fermentación formulado..... | 32 |
| Figura 5. Dibujo conceptual de primer bosquejo del fermentador | 34 |
| Figura 6. Dibujo conceptual del segundo bosquejo del fermentador | 34 |
| Figura 7. Dibujo conceptual del tercer bosquejo del fermentador..... | 35 |
| Figura 8. Diseño real del fermentador según el dibujo conceptual del primer bosquejo..... | 36 |
| Figura 9. Diseño real del fermentador según el dibujo conceptual del segundo bosquejo ... | 36 |
| Figura 10. Diseño real del fermentador según el dibujo conceptual del tercer bosquejo | 37 |
| Figura 11. Diseño elegido para la construcción del fermentador | 37 |
| Figura 12. Batería de cajones fermentadores en el módulo de fermentación de la Cooperativa Allima..... | 38 |
| Figura 13. Enchaquetado del cajón fermentador | 38 |
| Figura 14. Tapa del cajón fermentador..... | 39 |
| Figura 15. Orificios y ranuras en la base de los cajones fermentadores para el escurrido del cacao | 39 |
| Figura 16. Control de temperatura en los cajones fermentadores..... | 40 |
| Figura 17. Bitácora de trazabilidad del proceso de fermentación..... | 40 |
| Figura 18. Remoción de la masa fermentante | 41 |
| Figura 19. Ensamblaje mecánico-metal del fermentador | 42 |
| Figura 20. Prueba del sistema de aireación..... | 43 |
| Figura 21. Ensamblaje del sistema eléctrico..... | 43 |
| Figura 22. Diseño de base de datos | 44 |
| Figura 23. Formato de lectura de datos | 45 |
| Figura 24. Red neuronal de entrenamiento de modelo | 45 |
| Figura 25. Panel de control del fermentador..... | 46 |
| Figura 26. Gráficos estadístico de prueba U de Mann-Whitney | 49 |

Resumen

La fermentación del cacao es la etapa principal de poscosecha, ya que determina la calidad del producto; está influenciada por los fermentadores y temperatura. No obstante, agricultores en la región de San Martín aplican métodos tradicionales afectando su homogenización. Se tuvo como objetivo controlar y regular la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao, Chazuta-Perú. Para ello, se formuló un protocolo de parámetros básicos estandarizados, se construyó un sistema inteligente de control basado en deep learning para regular la temperatura y se evaluó la influencia del sistema inteligente de control en la regulación. Se empleó una investigación aplicada de nivel explicativo y enfoque cuantitativo, bajo un método hipotético deductivo. La unidad muestral correspondió al cacao en baba procesados por el dispositivo fermentador y se aplicó la técnica de deep learning para recolección de datos y el registro de trazabilidad del proceso de fermentación de forma tradicional y mediante el sistema. Los resultados demuestran la influencia del sistema inteligente en la regulación automática de la temperatura del proceso de fermentación mediante la prueba no paramétrica U Mann-Whitney para muestras independientes con p -valor < 0.05 a un margen de error del 5%. Se concluye que el fermentador de acero inoxidable eléctrico-mecánico articulado al sistema inteligente de control basado en deep learning asegura la homogenización de la fermentación de los granos con valor promedio de 79%.

Palabras clave: sistema de control, deep learning, fermentación, cacao, temperatura, fermentador, automatización de procesos

Abstract

Cocoa fermentation is the main post-harvest stage, since it determines the quality of the product; it is influenced by fermenters and temperature. However, farmers in the San Martin region apply traditional methods, affecting its homogenization. The objective was to control and regulate the temperature of the cocoa bean fermentation process at the Allima Cacao Agrarian Cooperative, Chazuta-Peru. For this purpose, a protocol of standardized basic parameters was formulated, an intelligent control system based on deep learning was built to regulate the temperature, and the influence of the intelligent control system on the regulation was evaluated. An applied research of explanatory level and quantitative approach was performed under a hypothetical deductive method. The sample unit corresponded to wet cocoa beans processed through the fermentation device and the deep learning technique was applied to collect data and record the traceability of the fermentation process in the traditional way and by means of the system. The results demonstrate the influence of the intelligent system in the automatic regulation of the temperature of the fermentation process by using the non-parametric Mann-Whitney U test for independent samples with p -value < 0.05 at a error margin of 5%. It is concluded that the electric-mechanical stainless steel fermenter articulated to the intelligent control system based on deep learning ensures the homogenization of the fermentation of the cocoa beans with an average value of 79%.

Keywords: control system, deep learning, fermentation, cocoa, temperature, fermenter, process automation.



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 los controles inoportunos 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.

A nivel nacional, (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.

Teóricamente, la investigación consideró conceptos de automatización de procesos, diseños en 2D/3D, tecnologías deep learning (algoritmos de inteligencia artificial) y procesos de fermentación de cacao basados en parámetros básicos de temperatura estandarizados, de tal modo que, se desplegó y recopiló información necesaria para la construcción del sistema inteligente de control, el cual mejorase la regulación de la temperatura en el proceso de fermentación del cacao con la intención de garantizar la comercialización granos finos.

En cuanto a la utilidad práctica, el estudio se justificó ya que se solucionó un problema que generaba bajo porcentaje en el rendimiento y calidad de cacao comercial en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda, la misma que se originaba por la deficiente autorregulación de la temperatura en el proceso de fermentación del cacao producto del empleo de métodos tradicionales y el desconocimiento de parámetros básicos de fermentación estandarizados.

Se planteó como objetivo general controlar y regular la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao basado en parámetros básicos estandarizados en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda, esto mediante los objetivos específicos: 1) formular un protocolo basado en parámetros básicos estandarizados de temperatura para el proceso de fermentación del grano de cacao; 2) construir sistema inteligente de control basado en Deep learning para regular la temperatura del proceso de fermentación y 3) evaluar la influencia del sistema inteligente de control basado en deep learning en la regulación de temperatura.

A partir de los objetivos se formuló la hipótesis: 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.

El trabajo de investigación se constituye en tres capítulos principales, siendo el capítulo I correspondiente a la revisión bibliográfica del estado del arte, en la cual se muestran los antecedentes, bases teóricas y definición de términos básicos; en el capítulo II se evidencia los materiales y métodos empleados para la realización del estudio y en el capítulo III se presentan los resultados encontrados, así como la discusión de las mismas. Finalmente, el informe enlista las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1. Antecedentes de la investigación

A nivel internacional. En Colombia, (Veira et al., 2019) en su estudio denominado “Proceso automático de fermentación y secado de cacao” buscaron mejorar la calidad del cacao y disminuir el tiempo de procesamiento. Construyeron un prototipo de acero inoxidable y un sistema automático basado en sensores, actuadores y un controlador programado en PLC que establece etapas de fermentación y secado, cada una de ellas caracterizadas por una gama de temperaturas y tiempos de funcionamiento específicos basados en parámetros estandarizados internacionalmente. Sus resultados demostraron que el diseño fabricado en acero inoxidable genera un proceso de fermentación y secado homogéneo del grano de cacao. Concluyeron que el sistema automático reduce la duración de estos procesos en un 66% en comparación con el uso de métodos tradicionales.

Otro estudio similar es el de (Parra et al., 2019), quienes en su investigación realizado en Ecuador denominado “Método alternativo para la fermentación del grano de cacao” buscaron desarrollar una nueva metodología para la fermentación de cacao a través de un sistema electromecánico. Construyeron un sistema con elementos eléctricos y mecánicos que regulan la temperatura al interior de la cámara de fermentación (cilindro rotatorio) durante un tiempo estimado de 24 a 28 horas, con una frecuencia de rotación de una vuelta por cada 2 horas. Sus resultados demuestran que la fermentación del cacao tipo CCN51 disminuye de 57,70 % a 24,61 % obteniendo granos con aroma agradable y temperatura relativamente constante, en el caso de cacao inoculado con lactobacilos el proceso de fermentación disminuye a 20 horas. Concluyeron que resulta factible fermentar granos de cacao de forma artificial o mecánica a comparación de los procesos o técnicas tradicionales.

En el contexto nacional. Una investigación realizada por (Ipanaque et al., 2017) denominado “Internet de las cosas aplicado al seguimiento del proceso de fermentación del cacao en la sierra de Piura” buscaron registrar algunos de los parámetros básicos de fermentación del grano de cacao. Implementaron un sistema que evaluó el comportamiento del proceso de fermentación conectado a una nube de equipos prototipos con sensores de temperatura, dióxido de carbono y oxígeno. Usaron equipos que registrasen la información

de las diferentes fases del proceso, para luego ser enviados a un sistema web que mostrase los datos adquiridos al usuario final. Concluyeron que el sistema embebido desarrollado en base a una arquitectura cliente servidor permite monitorear el proceso de fermentación de cacao, tanto en cajones de madera como en el fermentador de acero inoxidable.

En su estudio (Horna Martinez & Diaz Cercado, 2019) diseñaron e implementaron un prototipo automatizado para el proceso de conchado de chocolate en la empresa Industrias Sol Norteño, Perú. Realizaron un estudio aplicado de carácter experimental y de campo, con orientación a solucionar el problema de monitoreo y control de temperatura en la planta procesadora de chocolate mencionada. La población que consideraron fue el área de proceso de conchado y la muestra una máquina conchadora rotativa vertical. Emplearon técnicas de visita a campo, revisión literaria y recopilación de información. Además, materiales como dispositivos y programas de computadoras (sensor de temperatura, microcontroladores, sistemas embebidos, etc.). Concluyeron que el prototipo garantiza el control adecuado y monitorización de la temperatura, con un error de $\pm 2\text{ C}^\circ$ y el registro en cada segundo.

En el ámbito local Un artículo de revisión realizado por (Rios Jara, 2020) sostiene que el adecuado tratamiento, las prácticas aplicadas y los tipos de fermentadores son necesarios para lograr las mejores características organolépticas en el grano de cacao. Realizó una revisión bibliográfica sobre las prácticas para la construcción y uso de prototipos de fermentación de las cuales encuentra tres tipos de fermentadores (acero, tambor y tradicional) con diferentes características, inversión para su implementación y distintos resultados en la obtención de la calidad del cacao. Concluyó que el dispositivo con mejores resultados es el de tambor giratorio debido a que se adecúa a las características del proceso de fermentación que se realiza en la Región San Martín, Perú.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Fundamento variable independiente

1.2.1.1. Automatización de procesos

En la investigación planteada se propone una solución a la deficiente autorregulación de la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao basada en desarrollo tecnológico, la misma que es objeto de automatización de procesos. Según (González Filgueira & Rodríguez Permuy, 2018) automatizar íntegramente un proceso que se realiza

manualmente en algunas de sus fases sirve para reducir costes y tiempo de los tratamientos que esto conlleva de manera automática y a la vez.

Desde la perspectiva de (Kannan, 2019) los procesos industriales que se desean automatizar dependen de múltiples entradas y salidas, no lineales y de naturaleza restringida, en donde los sensores, sistemas de adquisición de datos, controladores y accionadores de los procesos mencionados tiene que estar absolutamente conectados en red para formar un sistema de control.

1.2.1.2. Dispositivo electromecánico

En el proceso del estado del arte identificamos estudios realizados por (Veira et al., 2019), (Parra et al., 2019) e (Ipanaque et al., 2017) quienes desarrollaron sistemas o dispositivos electromecánicos para mejorar el proceso de control y regulación de los parámetros básicos de fermentación del grano de cacao. En base a la literatura descubierta podemos definir a los dispositivos electromecánicos como un conjunto de circuitos electrónicos y piezas mecánicas que funcionan de controlador de un proceso general o específico conformando un mecanismo automatizado.

Un concepto a resaltar propuesto por (Ali & Frimpong, 2020) es que campos relacionados al aprendizaje automático e inteligencia artificial ocupan la idea innovadora de inducir la inteligencia en las máquinas para automatizar tareas y operaciones complejas a través de algoritmos de aprendizaje moderno. Esto nos da a entender que actualmente automatizar procesos incluye una gama de tecnologías que derivan y se complementan con el aprendizaje automático y profundo. He aquí la razón de incorporar aquellas tecnologías en nuestro proyecto.

1.2.1.3. Tecnología Deep learning

Deep learning (Aprendizaje profundo) es un método de aprendizaje automático que permite extraer de forma precisa información de los datos brutos de los sensores o dispositivos IoT (Internet de las cosas) implementados en entornos complejos. Dado a su estructura de múltiples capas también es apropiado para el entorno de computación de borde (Li et al., 2018).

Los algoritmos de aprendizaje profundo y habilitadores clave como las redes generativas adversarias, redes neuronales convolucionales y las transferencias de modelos, han cambiado

por completo la percepción del procesamiento de la información (Pouyanfar et al., 2018) constituyendo una técnica moderna para el procesamiento de imágenes y datos con resultados de gran potencial (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

Es por tal razón que (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018) declaran que dado a la aplicación con éxito del aprendizaje profundo en varios dominios actualmente está siendo incorporando en el ámbito de la agricultura. En la presente investigación desarrollaremos un software que nos permita analizar los datos tomados por los sensores localizados en el dispositivo electromecánico para luego ser puestos en análisis por el modelo Deep learning a implementarse.

Para realizar dicho requerimiento es necesario conceptualizar los siguientes términos que se desarrollarán e implementarán como complemento funcional del sistema inteligente de control basado en Deep learning:

- **Base de datos.** Se entiende por base de datos al conjunto de datos relacionados que se encuentran estructurados y almacenados en un sistema de gestión de base de datos (López de la Teja et al., 2017).
- **Software web.** Es un sistema de información basado en plataforma web que establece reglas y funcionalidades propias. Se caracteriza por presentar interfaz intuitiva, entendible y fácil de usar (Castro-Rivera et al., 2020).
- **App Mobile.** Según (Amasha et al., 2020) el desarrollo de aplicaciones móviles se refiere a la creación de software para dispositivos portátiles, teléfonos móviles y asistentes digitales que proporcionen funcionalidades para satisfacer las necesidades de los usuarios.
- **Software R.** Es una herramienta informática, específicamente un lenguaje y entorno de programación científica, numérica y estadística potencial para crear cálculos, gráficos y figuras de calidad (Rodríguez Silva, 2019).
- **Librerías Keras y TensforFlow.** Keras es una librería usada para la creación de modelos de Deep learning a bajo nivel que proporciona acceso mediante una API a las funcionalidades de la librería TensforFlow. Por otra parte, TensforFlow incluye bloques

básicos para la construcción de redes neuronales, optimizadores, etc., de forma modular y extensible (UOC, s. f.).

1.2.1.4. Sistema de control

Los sistemas de control se clasifican en dos tipos: sistema de control distribuido y sistema de control centralizado. Nuestro proyecto contempla el desarrollo de un panel de control que se integrará en un sistema de control centralizado para la monitorización y supervisión de la temperatura en el proceso de fermentación del grano de cacao en el dispositivo electromecánico construido. Según (González Filgueira & Rodríguez Permuy, 2018) este tipo de sistema se emplea en casos de procesos poco complejos, la misma que se gestiona en un solo elemento de control encargado de ejecutar todas las tareas programadas.

1.2.1.5. Diseño 2D/3D

Entre las fases para la construcción del dispositivo electromecánico, el cual es parte del sistema inteligente de control, se encuentra el diseño y simulación del prototipo fermentador en 2D y 3D. Para realizar los bosquejos nos basaremos en los requerimientos de expertos en temas de producción de cacao, de modo que, se logre obtener un dispositivo eficiente para el control del proceso de fermentación del grano de cacao. Dicho esto, (Bessaoudi et al., 2019) señalan que el aprendizaje subespacial multilineal generan gran interés por la reducción de la dimensionalidad y la clasificación de datos multidimensionales. En este sentido, los diseños 2D y 3D representan los espacios o imágenes dimensional o tridimensional que el dispositivo fermentador tomará con el objetivo de ser evaluado para su diseño y construcción.

1.2.1.6. Ensamblaje

Definido el bosquejo del dispositivo electromecánico se procederá a realizar el ensamblaje en tres etapas: Mecánico-metal, sistema aireación y ensamblaje de sensores y PLC. Dicho proceso consiste en la unión de los materiales metálicos y eléctricos que se ajusten al soporte del prototipo deseado y cumplan funciones establecidas. Según el estudio de (Almeida-Pozo et al., 2020) en esta etapa es recomendable realizar las pruebas funcionales con el objetivo de determinar el resultado final del dispositivo.

1.2.1.7. Controlador lógico programable (PLC)

De acuerdo a (Gómez Borges et al., 2020) el PLC tiene mayor recurrencia de uso en las industrias ya que permite realizar el control de sistemas basado en eventos y de proceso

continuos a través de procedimientos en tiempo discreto. El autor sostiene que el controlador lógico programable es descrito en algunos textos como miembro de la familia de los ordenadores que emplea circuitos integrados en lugar de dispositivos electromecánicos para implementar funciones de control.

1.2.2. Fundamento variable dependiente

1.2.2.1. Producción de cacao

Según la Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura, más conocida como FAO, en el año 2016, Perú fue el octavo país productor de cacao en el mundo con 2.4% de la producción mundial, a comparación de Costa de Marfil (33.0%), Ghana (19.2%) e Indonesia (14.7%). En el 2017, la Base de datos de estadística de comercio internacional de las Naciones Unidas (UN-COMTRADE) refiere que Perú ocupó la novena posición como exportador de granos de cacao, siendo los tres principales Costa de Marfil (42.3%), Ghana (16.9%) y Ecuador (7.5%) (INIA, 2019).

Un reciente estudio realizado por (López Cuadra et al., 2020) señalan que la mayor concentración de explotación del cacao se encuentra en los continentes africanos, asiáticos y americanos. Asimismo, refieren que en el año 2019 el Ministerio de Agricultura y Riego del Perú expuso que el cacao representaba la principal fuente de ingreso de 40 – 50 millones de personas a nivel mundial, así (Peñalba Achurra et al., 2019) sostienen que el mercado global del cacao tiene una demanda importante dado al aumento del 30% en el año anterior (2020).

En cuanto a la producción del cacao por departamentos en el Perú, en el año 2017 San Martín ocupó el primer lugar de producción, lo cual se evidencia por el mayor número de subproyectos cofinanciados por el Programa Nacional de Innovación en Pesca y Acuicultura, sumando un total de 14 proyecto, así lo señala (INIA, 2019).

1.2.2.2. Proceso de poscosecha de cacao

El cacao (*Theobroma cacao L.*) y sus subproductos son utilizados ampliamente por industrias alimentarias, cosméticas y farmacéuticas por presentar alto contenido de metabolitos secundarios de nivel significativo en antioxidantes (Gabbay Alves et al., 2018). La composición del grano de cacao depende de sus orígenes y métodos de procesamiento poscosecha, como la fermentación, secado y tostado (Agus et al., 2018). A continuación, nos

basamos en (Aguilar, 2017) para describir los procesos más importantes que repercuten en la generación de precursores químicos de aroma y sabor del grano de cacao:

- **Fermentación.** Un método o técnica para realizar la fermentación consiste en colocar el grano de cacao en baba recién extraído de la mazorca en cajones de madera, que posteriormente tienen que ser tapados por hojas de plátanos u otros materiales entre el transcurso de 7 días. En este proceso se generan microorganismos que conciben el cambio fisicoquímico del grano.

Además de las actividades mencionadas para realizar el proceso de fermentación es necesario considerar aspectos como la preparación de los cajones, escurrimiento de baba, volteo de granos, registros de pruebas de corte, humedad, temperatura, etc.

- **Secado.** Científicamente se ha comprobado que la formación de Ocratoxina, el cual es dañino para salud, se genera cuando los granos de cacao húmedos o parcialmente despulpados son fermentados durante el proceso de secado.

Entre las sugerencias para que este proceso resulte eficiente, es que las plataformas de secado tienen que estar limpias, ventiladas, libre de sombras y en espacios cómodos que permitan realizar la remoción de los granos cada 20 a 30 min.

1.2.2.3. Fermentadores de cacao

(Rios Jara, 2020) refiere que obtener granos de cacao con calidad organoléptica depende de múltiples factores, de los que resalta el tipo de fermentador. En su investigación basada en una revisión bibliográfica sobre los dispositivos usados en la fermentación de cacao identifica tres tipos: Caja de madera, tambor giratorio, acero inoxidable. Cada una de ellas presentan sus propias características de construcción, medidas, etc. El autor afirma que debido a la deficiente y heterogénea tecnología de los fermentadores no se pueden alcanzar productos de calidad internacional.

1.2.2.4. Parámetros de la calidad del grano de cacao

La Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica (Procomer, s. f.) define en su Manual de poscosecha de cacao fino y de aroma los siguientes parámetros básicos de calidad del grano de cacao:

- **Características físicas:** porcentaje de humedad del grano, peso, grosor de cáscara, presentación exterior y visual del grano, etc.
- **Características químicas:** contenidos de grasa y azúcares, pigmentación de los cotiledones y moléculas responsables del sabor y la aroma.
- **Características organolépticas:** sabores y aromas diferenciados, libre de defectos.
- **Bioseguridad alimentaria:** son las relacionadas con la salud y nutrición humana, tales como flavonoides, mico-toxinas, contaminantes y residuos de metales pesados.

En la Figura 1 se manifiesta los parámetros básicos de fermentación definidos por la Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica.

Figura 1.

Parámetros básicos de fermentación

| Parámetro de clasificación | Límite mínimos y máximos permitido | Característica relevantes | Foto ilustrativa | | | | |
|-----------------------------|------------------------------------|--|---|--|-----------|---|---|
| Peso promedio del grano (g) | 1,05 | Grano hinchado y grueso. No presenta defectos. Aroma a cacao fermentado. Ausencia de olores y sabores extraños |  | Granos con moho interno | Máximo 3% | Posee colonias o puntos blancos, es uno de los defectos más graves del proceso |  |
| Humedad mínima (%) | 6,5 - 7,0 | Excelente color, olor y sabor a chocolate. Su cáscara se desprende fácilmente |  | Grano violeta o morado | Máximo 8% | Color violeta o morado, sabor amargo, ácido y astringente |  |
| Granos bien fermentados | Mínimo 75% | Textura fisurada en su interior, desarrollo de coloración específica café o canelo dependiendo de su genética |  | Grano pizarroso sin fermentar | Máximo 1% | Grano liso, compactado, no presenta fisuras en su interior |  |
| Granos sobrefermentados | Máximo 3% | Grano liviano, color café oscuro o negro, olor y sabor desagradable ajamonado, rancio |  | Grano perforado o pegado | Máximo 1% | Perforaciones ocasionadas por insectos, germinación de la radícula, dos o más granos unidos, planos o quebrados |  |
| | | | | Olores desagradables (humo, moho, otros) | 0% | Granos con sabores rancio, a manteca ácida, presentan pérdida de peso en los granos |  |

Nota. Reproducido de Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica (Procomer, s.d.).

Del mismo modo, define las siguientes fases de fermentación:

- **Fermentación anaeróbica.** Conocida como fermentación alcohólica. Se desarrolla durante las primeras 48 hrs y es donde se inicia la transformación de azúcares de la pulpa en alcohol (etanol). Esta fase permite el crecimiento y la colonización de levaduras y microorganismos.
- **Fermentación aeróbica.** Conocida como fermentación acética. Esta fase incrementa la concentración de ácido acético y desarrolla el olor particular a vinagre. Se caracteriza por el aumento de la temperatura (40 °C) y en el valor del pH entre las 24 y 72 horas. Además, se presenta un aumento de concentración de etanol, calor, pH y aeración.

1.2.2.5. Control y regulación del proceso de fermentación

La etapa fundamental de poscosecha de cacao es el proceso de fermentación de los granos ya que determina la calidad final del producto (Horta-Tellez et al., 2019). Se ha demostrado que

dicho proceso se suele realizar a través de métodos o técnicas tradicionales, además se reconoce que los cacaoteros desconocen los parámetros básicos de fermentación estandarizados internacionalmente, por lo que podemos afirmar que estos factores conllevan a la deficiente autorregulación del proceso de fermentación.

Ante lo mencionado, el término “control y regulación del proceso de fermentación” se refiere a la acción de regular los parámetros que influyen en la etapa de fermentación del grano de cacao, como la humedad, temperatura, etc., a través de remociones de la masa de cacao esparcidos en los fermentadores para que se establezcan según protocolos estandarizados de fermentación. Según Saldaña (2013, citado en Huayama Soplá & Siche 2020) el control del proceso de fermentación ha incorporado técnicamente herramientas digitales que permiten el uso de mecanismos automatizados para monitorizar y supervisar la fermentación, de modo que, contribuya a la calidad del grano.

1.2.2.6. Frecuencia de remoción y drenado

Estas etapas son consideradas fases indispensables desde el inicio de la fermentación, que dependen de la variedad del cacao, fermentador y método que se aplique. Normalmente suelen realizarse a partir de las 48 horas de haber empezado el proceso de fermentación y su frecuencia dependerá del estado de los parámetros básicos (Huayama Soplá & Siche, 2020).

1.2.2.7. Medición de temperatura

Consiste en registrar la temperatura de los granos de cacao durante el proceso de fermentación con el objetivo de asegurar la trazabilidad del grano fermentado. El registro es de suma importancia ya que permite evaluar y asumir seguridad del correcto proceso de fermentación. Para ello es recomendable identificar los fermentadores de acuerdo a códigos de lote (Aguilar, 2017).

1.3. Definición de términos básicos

Dispositivo. Según (Parra et al., 2019) un dispositivo está conformado por múltiples elementos que cumplen funciones complementarias para realizar un trabajo en específico.

Deep learning. (Chartrand et al., 2017) sostienen que es una clase de método de aprendizaje automático basado en modelos de redes neuronales artificiales multicapa que procesa grandes cantidades de datos.

Sensores. De acuerdo a (Nivia Vargas & Jaramillo Jaramillo, 2018) los sensores son dispositivos que responden a un estímulo de una determinada entrada, que posteriormente genera una respuesta en señal eléctrica.

PLC. El Controlador Lógico Programable (PLC) utiliza circuitos integrados en lugar de dispositivos electromecánicos para implementar funciones de control (Gómez Borges et al., 2020).

Datos. Los datos son representaciones de un atributo con diferentes caracteres, sea por infraestructura, tipo, valor, etc. (Meneses Rocha, 2018).

Sistema. Un sistema integra componentes que se interrelacionan para cumplir un objetivo en común en función a su entorno y limitantes.

Control. Según (Montes de Oca et al., 2018) el control constituye un soporte para la toma de decisiones de manera que se logre eficiencia, eficacia y efectividad en los procesos.

Protocolo. Representa un conjunto de reglas o normas que se cumplen según especificaciones establecidas.

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Tipo y nivel de investigación

Este estudio fue de tipo aplicada, ya que se aplicó conocimientos de automatización de procesos y tecnologías Deep learning para plantear una solución que permita regular la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en base a la formulación de un protocolo fundamentado en parámetros estandarizados. El enfoque fue cuantitativo, ya que se recopiló y analizó datos cuantitativos sobre la variable dependiente, de manera que se pueda responder a la hipótesis de la investigación (Cruz del Castillo et al., 2014).

El nivel de investigación correspondió al explicativo. Según (Hernández Sampieri et al., 2014) está dirigido a responder causas, por lo que se enfoca en explicar por qué ocurre un fenómeno o en qué condiciones se manifiesta. Así, en el presente estudio se abordó estructuradamente un sentido de entendimiento de la regulación de la temperatura en el proceso de fermentación de cacao, para explicar en qué medida un sistema inteligente de control basado en Deep learning logra el propósito planteado.

El método fue hipotético deductivo, ya que según (Pimienta & de la Orden, 2017) “parte de un enunciado general o de resultados derivados de estudios previos, obtenidos como consecuencia de la observación de una investigación” (p. 46). En el presente contrastamos una hipótesis (causa-efecto) para validar su aceptación o rechazo.

2.2. Diseño de investigación

Se realizó un estudio de carácter experimental porque la construcción del sistema inteligente de control basado en Deep learning tuvo que ser sometido a varias pruebas funcionales que validen las calibraciones de los sensores y el sistema de enfriamiento y calefacción incorporados en la misma, con la finalidad de garantizar un ensamblaje eficiente y seguro para la regulación de temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao basado en parámetros básicos estandarizados.

Específicamente, el estudio se efectuó bajo un diseño de experimento puro con pos prueba únicamente y grupo de control, fundamentado en la teoría de (Hernández Sampieri et al., 2014); quienes señalan que este tipo de investigación solo incluye dos grupos, uno que recibe

el tratamiento y el otro no. Es decir, el grupo experimental: Sistema inteligente de control basado en Deep learning, sólo alcanzó dos niveles: presencia y ausencia, para ver su efecto sobre la Regulación de la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao medido por el % de fermentación, en comparación con el grupo de control: Fermentación tradicional.

En este sentido, fue pertinente realizar un ajuste sobre la medición de la variable, en la que se consideró medir la influencia sobre el porcentaje (%) de fermentación resultante de la regulación de la temperatura mediante la solución tecnológica y de forma tradicional. Siempre y cuando, según (Hernández Sampieri et al., 2014), el experimento posea las mismas características. Esto se reflejó considerando el protocolo de fermentación adoptado por siete días para ambos casos.

2.3. Población y muestra

La población muestral del estudio se conformó por un total de 30 muestras finales de porcentaje de fermentación de cacao de tipo clon CCN-51 y ICS95. acopiado en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. En cuanto a la muestra, se tomaron 15 valores de porcentaje de fermentación por el Sistema inteligente de control basado en Deep learning (grupo experimental) y 15 valores de porcentaje de fermentación de forma tradicional (grupo de control). Es decir, se aplicó un muestro no probabilístico por conveniencia.

2.4. Técnicas e instrumento de recolección de datos

La técnica que se empleó fue la medición de la temperatura a través de sensores incorporados en el dispositivo electromecánico, las cuales proporcionaron datos que fueron recopilados y procesados a través del controlador lógico PLC. Se construyó una base de datos como instrumento para el sistema de recolección local de microcomputadora, la misma que valió para desarrollar el software web y proceder al análisis del modelo Deep Learning a complementarse en el sistema inteligente de control.

Los datos de la temperatura según parámetros básicos de fermentación, fueron capturados por los diferentes sensores que se instalaron en el dispositivo de fermentación y a través de un PLC y un software diseñado para ese propósito se almacenaron en una base de datos.

Para construir el modelo, se aplicó como técnica, en primera instancia, la lectura de datos del Clon, tipo de fermentación, temperatura y tiempo de rango por hora. Seguidamente se pre-procesó los datos, ello implicó la limpieza de datos y conversión de caracteres a binario.

Finalmente se procedió a entrenar al modelo a través del procesamiento de red neuronal *backpropagation*. Mediante el entrenamiento se definió las épocas (epocs) que hace recorrido el algoritmo respecto a su ganancia y error.

2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Como técnica de procesamiento y análisis de datos se procedió a escribir código basado en C para la conexión de los canales o puertos de tipo serial del PLC con la microcomputadora. Los datos almacenados fueron analizados y procesados para ajustes del protocolo de fermentación que sirvieron como base para programar las acciones del PLC.

Para validar la hipótesis: 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, y teniendo en cuenta que la investigación se fundamenta en el desarrollo tecnológico, nos basamos en la experimentación y observación técnica profesional de expertos en la producción de cacao, los cuales en base a sus conocimientos validaron la eficiencia del sistema construido en su totalidad.

2.6. Metodología

Tal como se planteó en el proyecto de investigación, se efectuó la siguiente metodología:

- a) Se estudió el proceso de fermentación identificando los parámetros que intervienen en el mismo.
- b) En base al estudio de (Ruíz Muñoz, 2019) se plantearon parámetros estandarizados del proceso de fermentación durante sus diferentes etapas.
- c) Se construyó el dispositivo que cuenta con partes eléctricas que permitirán el movimiento de los componentes mecánicos. Este dispositivo además contó con sensores electrónicos de temperatura.
- d) A través de los sensores electrónicos se capturó información de la temperatura a través de un PLC, gracias al cual los datos se almacenaron en un base de datos. Estos fueron: frecuencia de medición, temperatura y tiempo de la medición.
- e) Con la base de datos disponible y en función a los parámetros estandarizado del proceso de fermentación planteado en el paso **b**, se construyó una aplicación basada en Deep learning a fin de que a través del PLC el sistema enviase señales para que el dispositivo de

fermentación inicie movimientos peristálticos gracias a los cuales se espera que la temperatura producto de la remoción empiece a descender y en un proceso de retroalimentación todo a través de los sensores de temperatura y el PLC, el sistema mismo mande la orden para detener el movimiento.

Para realizar la construcción del sistema inteligente de control basado en Deep learning se planteó las siguientes fases:

Fase 1. Diseño de matriz de requerimientos de ensamblaje que considere los requisitos de especialistas en fermentación de cacao.

Fase 2. Bosquejos en 2D/3D del dispositivo electromecánico.

Fase 3. Ensamblaje en tres etapas: mecánico – metal, sistema de aireación, ensamblaje de sensores y PLC.

Fase 4. Desarrollo del sistema inteligente de control en tres etapas: base de datos y software web, construcción del modelo deep learning.

Fase 5. Instalación y pruebas del software en crudo en el dispositivo.

Fase 6. Pruebas funcionales e informes técnicos.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

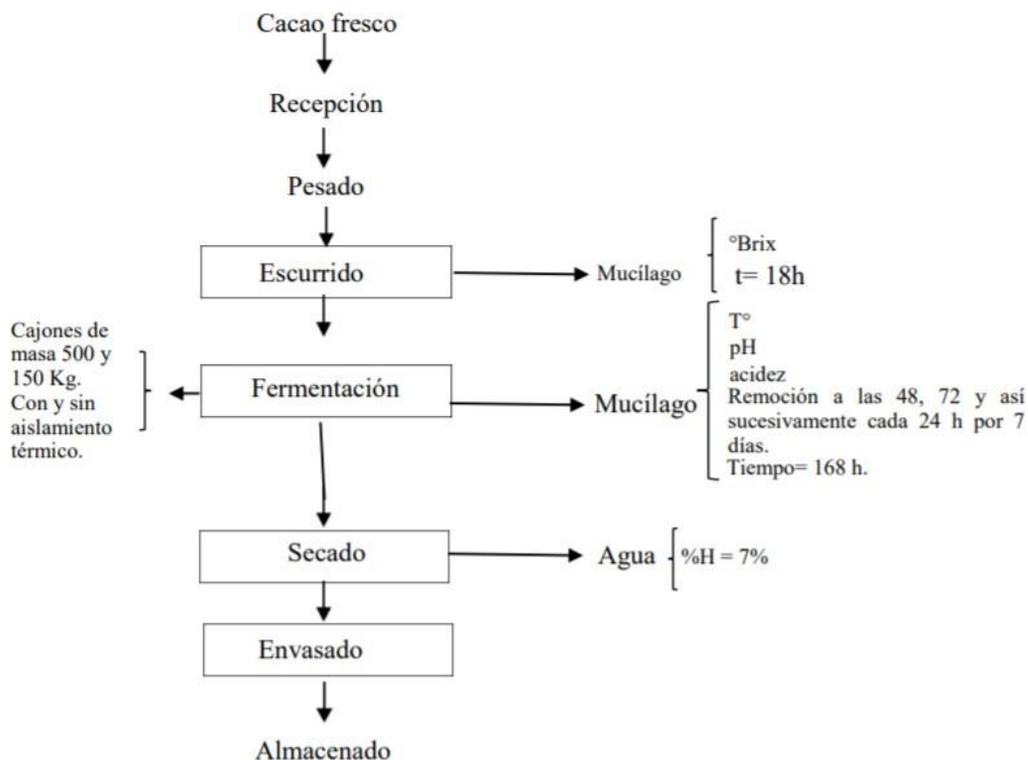
3.1. Resultados

3.1.1. Formulación de un protocolo basado en parámetros básicos estandarizados de temperatura para el proceso de fermentación del grano de cacao

Se determinó un protocolo de parámetros básicos estandarizados de temperatura según la investigación de (Ruíz Muñoz, 2019) y (Veira et al., 2019) para el control y regulación de la fermentación del cacao en el fermentador eléctrico-mecánico, parte del sistema inteligente de control basado en deep learning. Para ello, se analizaron los siguientes flujos:

Figura 2.

Diagrama de flujo para la obtención de grano de cacao



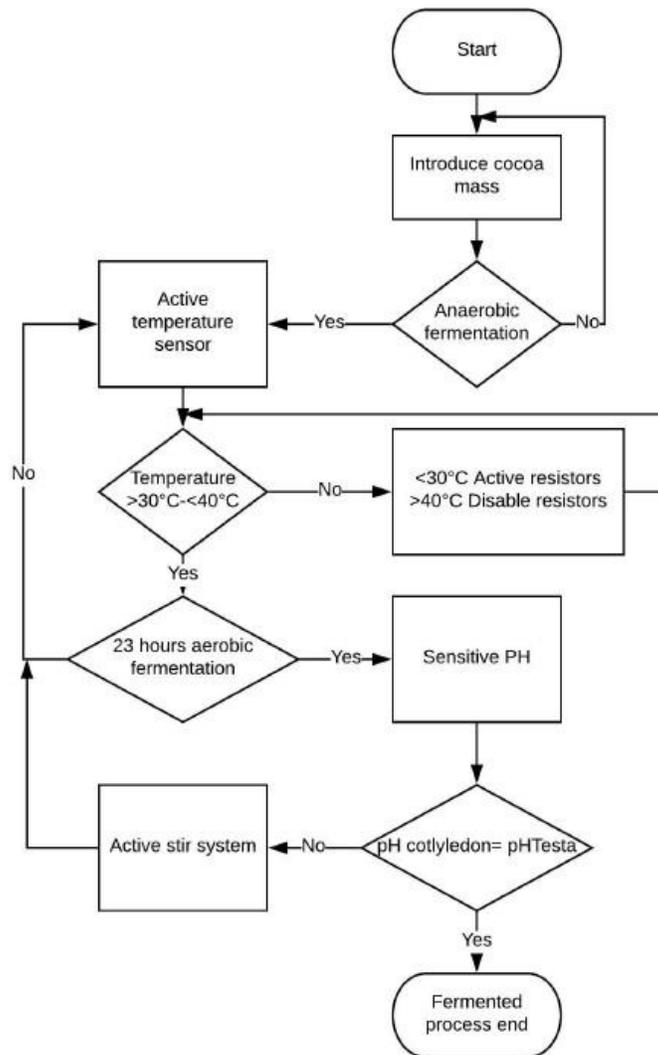
Nota. Reproducido de (Ruíz Muñoz, 2019).

En la Figura 2 se aprecia el diagrama de flujo para la obtención de grano de cacao realizado por Ruíz Muñoz en su estudio llevado a cabo en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda, en donde los parámetros de su evaluación corresponden principalmente a la temperatura (T°) y pH de la masa; siendo la remoción para obtener homogeneidad a las 48 hrs, 72 hrs y

sucesivamente cada 24 hrs por el periodo de siete días, en cajones de 500 kg y 150 kg, con y sin aislamiento térmico.

Figura 3.

Diagrama de flujo de la etapa de fermentación



Nota. Reproducido de (Veira et al., 2019).

La Figura 3 se evidencia el flujo de la etapa de fermentación del grano de cacao realizado por Veira y otros autores en Colombia, aplicado para la remoción de los granos en un fermentador eléctrico-mecánico. Estos refieren que el flujo inicia con la introducción del cacao al fermentador, la cual pasa por una evaluación de fermentación anaeróbica que si es óptimo se activan los sensores del parámetro de temperatura masa, esta se avalúa en rango de $> 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $< 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para activar según el valor la remoción de regulación. Posteriormente,

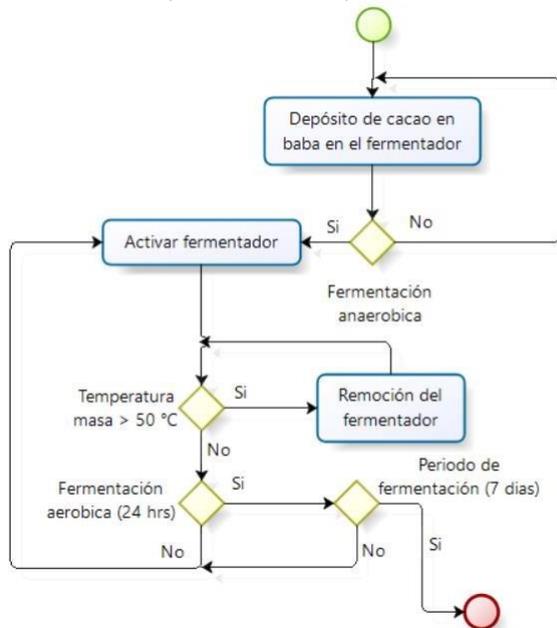
evalúan las horas de fermentación aeróbica, para activar el sensor de pH que pasa a la siguiente condición: $\text{pH}_{\text{contlyledon}} = \text{pH}_{\text{testa}}$, que si se cumple se finaliza la etapa de fermentación.

Ahora, en base al análisis expuesto y considerando las recomendaciones y experiencia del equipo técnico encargado de los módulos de fermentación de cacao en la cooperativa, se tomó los parámetros básicos de temperatura y pH masa para integrarlos en el sistema inteligente de control basado en deep learning. En este caso, el control de su medición se realiza de forma automatiza y es monitorizada en un panel que funciona como software.

Fue imprescindible tomar en cuenta las condiciones climáticas de la zona de Chazuta, por lo que el protocolo de la temperatura masa tuvo como parámetro máximo $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es decir, si el valor detectado por el sensor de temperatura masa integrado en el fermentador señalase valores superiores a lo establecido, se envía señales eléctricas para activar la remoción del grano de cacao hasta descender, los mismos son procesados por el algoritmo de deep learning codificado.

De este modo, el flujo del protocolo formulado se muestra en la Figura 4:

Figura 4.
Protocolo de fermentación formulado



3.1.2. Construcción de un sistema inteligente de control basado Deep learning para regular la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao

Considerando la metodología propuesta en el perfil del proyecto para la construcción del sistema, se realizaron las siguientes actividades:

Fase 1. *Diseño de matriz de requerimientos de ensamblaje que considere los requisitos de especialistas en fermentación de cacao.* En esta fase se determinó las consideraciones técnicas funcionales de los consultores especialista en fermentación de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda para realizar el bosquejo del dispositivo fermentador, siendo el resultado nueve requisitos fundamentales presentados en la Tabla 1.

Tabla 1.

Requerimientos funcionales para la construcción 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 | <u>Debe permitir la medición de la temperatura y pH de la masa fermentante.</u> |

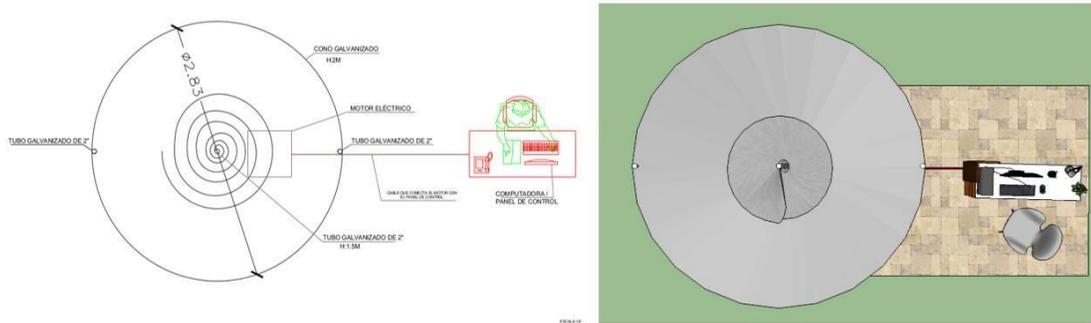
La matriz propuesta de requerimientos es información pertinente para el ensamblaje del fermentador. La principal característica fue asegurar que el dispositivo permita drenar el jugo del proceso de fermentación en los primeros días, además admita realizar dicho proceso de forma anaeróbica y aeróbica, ya que como se expresó en el marco teórico, estos factores conciben la calidad sensorial final de los granos; aspecto clave para asegurar el comercio de cacao internacional sujeto a estándares de calidad.

Fase 2. *Bosquejos en 2D/3D del dispositivo electromecánico.* Se realizó una lluvia de ideas para plantear bosquejos del dispositivo fermentador electromecánico, estos se trazaron en hojas y después se diseñaron en un ordenador utilizando la herramienta de AutoCAD. Se elaboraron tres bosquejos, los cuales presentamos a continuación:

- **Primer bosquejo.** Incorporó las siguientes características: forma cónica con elevación de 45°, movimientos interiores tipo batido, cubierta superior abierta, panel de control, sensores de pH y temperatura, y capacidad 120 kg (Figura 5).

Figura 5.

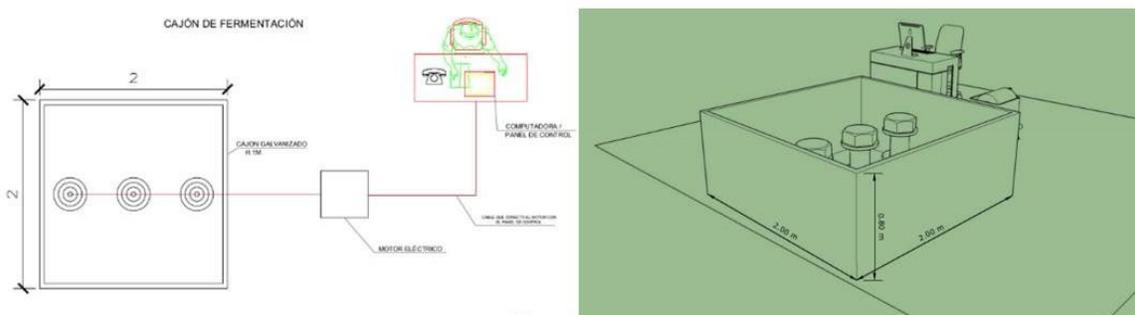
Dibujo conceptual de primer bosquejo del fermentador



- **Segundo bosquejo.** Incorporó las siguientes características: forma de cubica cuadrangular de 2 m de ancho x 1 m de altura; cubierta superior con tapa automática para cerrar y sellarse, impidiendo el paso del aire; movimiento con paletas horizontales; sistema de enfriamiento; panel de control; sensores de pH, oxigenación y temperatura; y capacidad 120 kg (Figura 6).

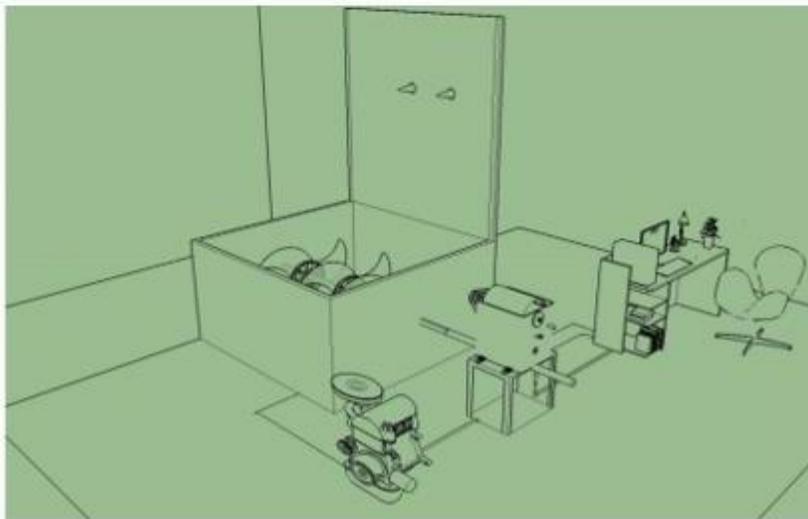
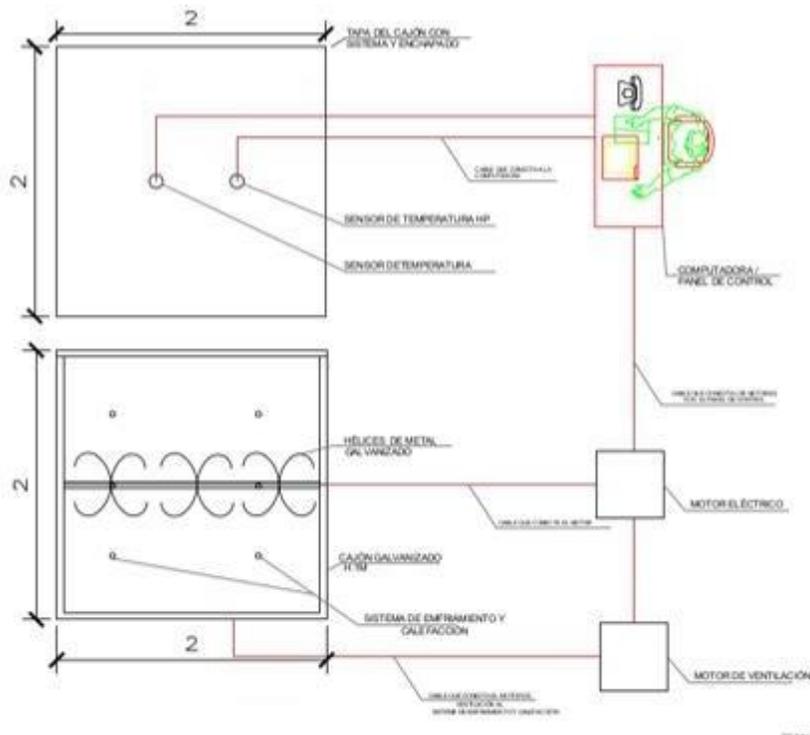
Figura 6.

Dibujo conceptual del segundo bosquejo del fermentador



- **Tercer bosquejo.** Incorporó las siguientes características: forma de cubica cuadrangular de 2 m de ancho x 0.8 m de altura, cubierta superior abierta, tres pernos en el interior realizan el movimiento, panel de control, sensores de pH y temperatura, y capacidad de 150 kg (Figura 7).

Figura 7.
Dibujo conceptual del tercer bosquejo del fermentador

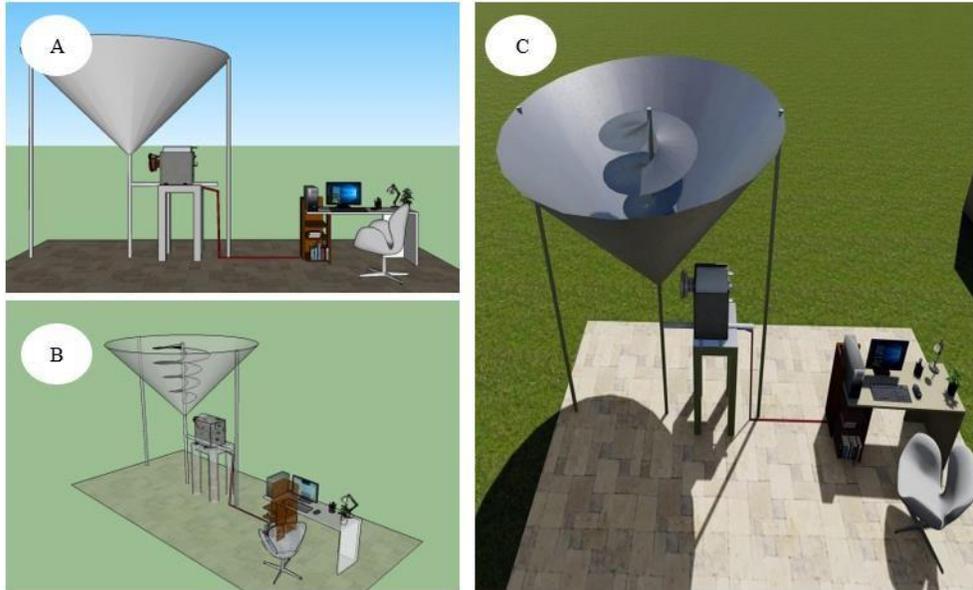


Posterior a los dibujos, se planteó el bosquejo final de cada propuesta en diseño 2D, isométrico y 3D a través de AutoCAD, acorde a la realidad del proyecto para que la elección del fermentador de granos de cacao que funcionará como sistema inteligente de control satisfaga las necesidades funcionales de los expertos de la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. En las siguientes páginas se exponen los bosquejos finales.

La Figura 8 muestra la propuesta final acorde a la realidad de la construcción del dispositivo fermentador según el dibujo conceptual del primer bosquejo, en donde A representa el diseño en 2D, B el diseño isométrico y C el diseño en 3D.

Figura 8.

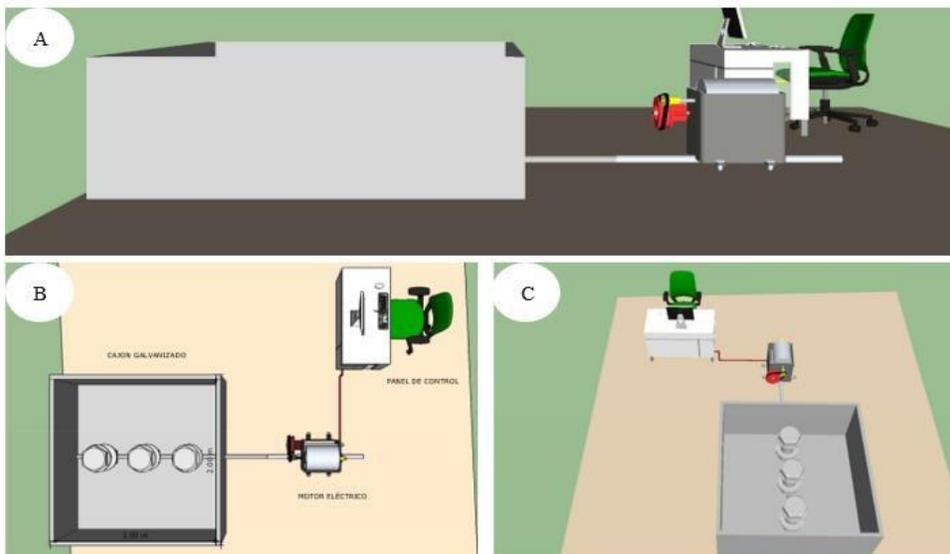
Diseño real del fermentador según el dibujo conceptual del primer bosquejo



Del mismo modo, en la Figura 9 se evidencia la propuesta final acorde a la realidad de la construcción del dispositivo fermentador según el dibujo conceptual del segundo bosquejo, en donde A representa el diseño en 2D, B el diseño isométrico y C el diseño en 3D.

Figura 9.

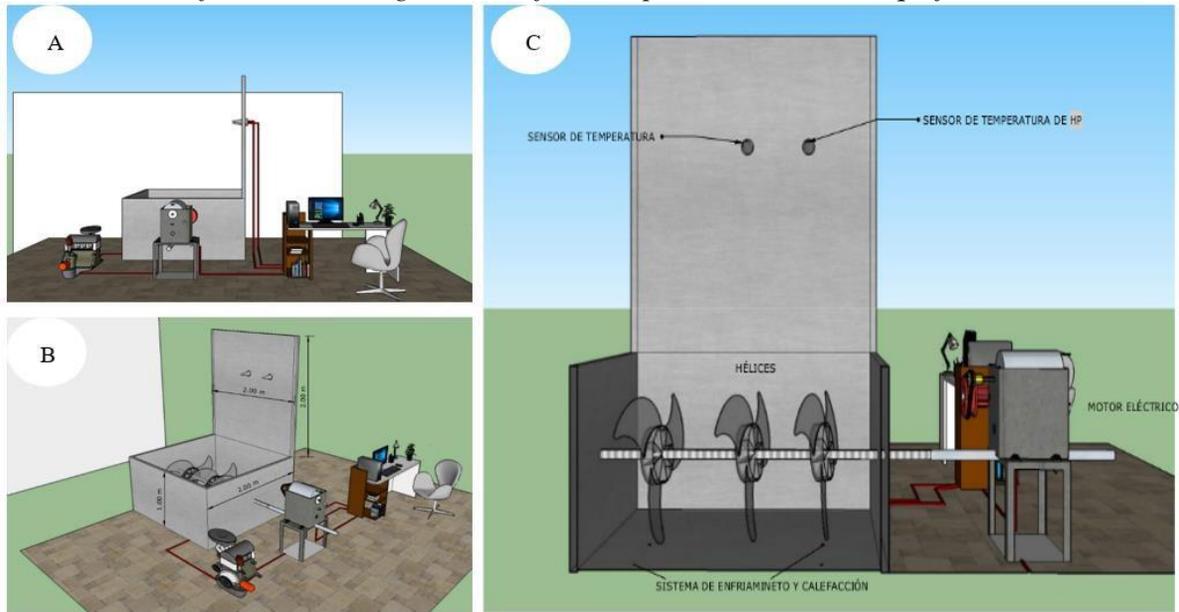
Diseño real del fermentador según el dibujo conceptual del segundo bosquejo



Por otra parte, la Figura 10 presenta la propuesta final acorde a la realidad de la construcción del dispositivo fermentador según el dibujo conceptual del tercer bosquejo, en donde A representa el diseño en 2D, B el diseño isométrico y C el diseño en 3D.

Figura 10.

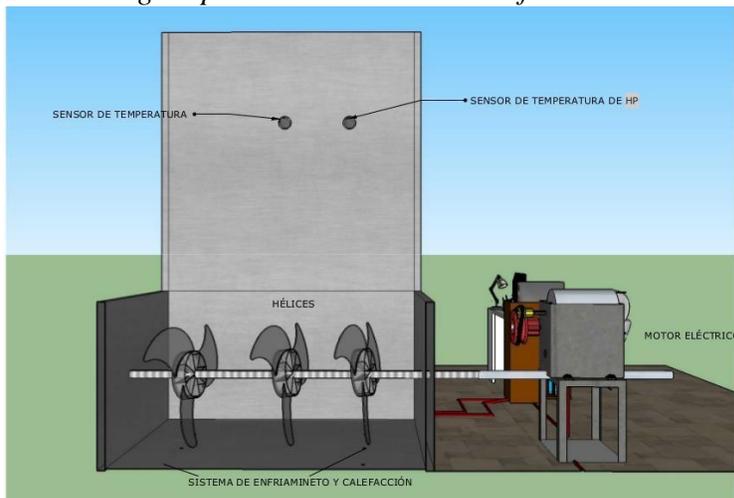
Diseño real del fermentador según el dibujo conceptual del tercer bosquejo



Previa valuación del equipo técnico de la Cooperativa y en base a su experiencia, se realizó la elección del tercer diseño. La misma que fue consignado a ciertos ajustes pertinentes para el proceso de fermentación garantizable. La Figura 11 muestra el diseño elegido.

Figura 11.

Diseño elegido para la construcción del fermentador



Ahora, para definir los criterios de elección, se realizó un diagnóstico del proceso de fermentación del grano de cacao en baba en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda, en el cual se identificó lo siguiente:

- Cajones fermentadores: Para el fermentado del cacao la cooperativa cuenta con baterías de cajones dispuestos en forma lineal, cada batería consta de seis cajones con dimensiones de 80 cm x 80 cm x 70 cm (capacidad 500 kg de cacao); y cajones de menor tamaño 50 cm x 50 cm x 60 cm (capacidad 150 kg de cacao) (Figura 12).

Figura 12.

Batería de cajones fermentadores en el módulo de fermentación de la Cooperativa Allima



- Cajón fermentador de madera con espesor de 2 pulgadas y enchaquetado (aislante) con tecnopor de 2 pulgadas para mantener el calor generado durante el proceso de fermentación (Figura 13).

Figura 13.

Enchaquetado del cajón fermentador



- Asimismo, se identificó que los cajones fermentadores cuentan con tapas de madera enchaquetados con tecnopor para mantener la temperatura interna y no verse influenciado por la temperatura ambiente (Figura 14).

Figura 14.

Tapa del cajón fermentador



- Para realizar el proceso de fermentación utilizan baterías de seis cajones distribuido de forma lineal, de los cuales el primer cajón cuenta con ranuras y orificios que permiten el drenado de jugo de cacao en baba durante las primeras 45 hrs o etapa de pre escurrido, proceso donde se genera la fermentación anaeróbica (Figura 15).

Figura 15.

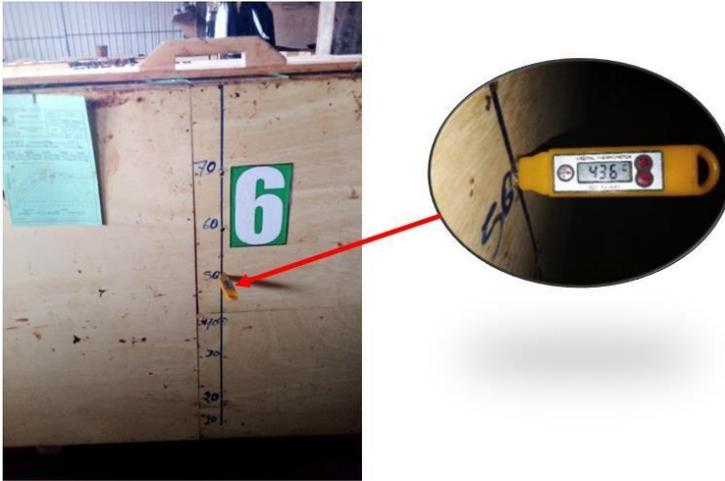
Orificios y ranuras en la base de los cajones fermentadores para el escurrido del cacao



- Los cajones cuentan con agujeros distribuidos cada 10 cm en el lado lateral, que permiten introducir termómetros digitales con punta de metal para tomar la temperatura de forma diaria en tres niveles del cajón fermentador (inferior, medio y superior) (Figura 16).

Figura 16.

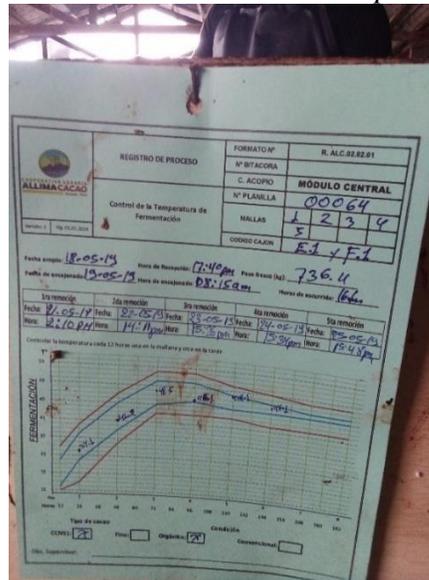
Control de temperatura en los cajones fermentadores



- En cuanto monitoreo del proceso de fermentación es realizado mediante una bitácora; formato en el que se encuentra una curva de temperatura ideal para la fermentación del cacao, esto permite comparar con las temperaturas que se toman de forma diaria y realizar acciones correctivas si fuera necesario (Figura 17).

Figura 17.

Bitácora de trazabilidad del proceso de fermentación



herramientas remos de madera tipo palana y un balde de plástico. Cabe señalar que este proceso es importante para homogenizar la fermentación del cacao y así lograr calidad organoléptica requerida para su comercialización (Figura 18).

Figura 18.

Remoción de la masa fermentante



Una vez definido los criterios de elección, se diseñó una matriz que permitiera identificar criterios de diseño que debe cumplir el dispositivo fermentador en base a los requerimientos (ver Tabla 1). Para ello, se realizó la propuesta determinante (Tabla 2).

Tabla 2.

Criterios determinantes para la elección del fermentador

| Requisitos | Propuesta |
|-------------------|--|
| 1 | A través de agujeros incorporados en el prototipo fermentador |
| 2 | Por gravedad y presión |
| 3 | A través de ranuras que permitan cerrar y abrir tipo agujeros. |
| 5 | A través de un mecanismo automatizado, paletas o tornillos sin fin. |
| 6,7 | Cajón fermentador cerrado y enchaquetado con un material aislante de calor. |
| 8 | Giro automatizado del cajón fermentador. |
| 4,9 | Incorporación de sensores de temperatura y pH masa instalados en el fermentador. |

En base a estos criterios descritos fue que el equipo técnico de Allima Cacao selecciono el diseño ideal para el proceso de fermentación del grano de cacao (ver Figura 11), puesto que busca la impermeabilidad del sustrato durante la fermentación y giro automático de la masa del cajón, y porque sus sistemas de control son acoplables para instalar los algoritmos de inteligencia artificial (deep learning).

Asimismo, el equipo técnico en base a su experiencia, recomendó que la capacidad del fermentador sea de 150 kg, de manera que se optimice adecuadamente. Por lo que, la distribución del tamaño correspondió a 0.60 m altura del dispositivo, 0.50 m ancho del cajón y 0.50 m alto del cajón. Con estas consideraciones, se cerró la fase 2.

Fase 3. Ensamblaje en tres etapas: mecánico – metal, sistema de aireación, ensamble de sensores y PLC. Esta fase fue realizada en colaboración con el personal de la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda y el servicio de terceros para la construcción robusta del dispositivo fermentador. Cabe señalar que se ajustó el diseño del cajón fermentador a tipo tambor conservando las dimensiones establecidas.

- Ensamblaje mecánico-metal: Se realizó de acuerdo al diseño establecido. La construcción inició con la base o plataforma de acero inoxidable, lo cual involucro el sistema de rotación, tapa y chaquetas de agua. A partir de ello, se obtuvo como resultado la estructura del prototipo de la base del fermentador. En la Figura 19 se puede apreciar: A) Fijación del eje central con el motor, B) Base mecánica del prototipo, C) Base del prototipo con su tapa y D) Prototipo fermentador a nivel mecánico.

Figura 19.

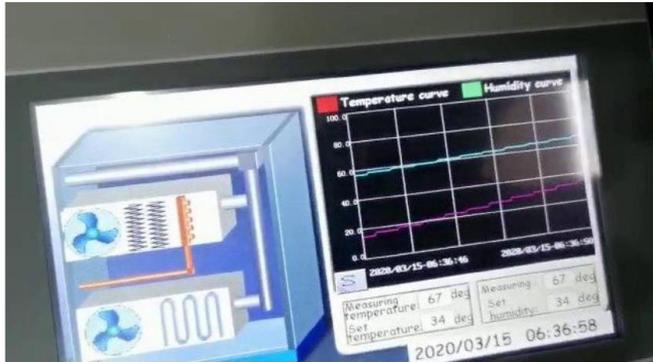
Ensamblaje mecánico-metal del fermentador



- Ensamblaje sistema aireación: Se ensambló el sistema de aireación tanto para enfriamiento y calefacción de acuerdo al diseño aceptado y los requerimientos de los expertos en fermentación de cacao. La Figura 20 muestra las pruebas realizadas al sistema de aireación visualizadas en el panel view (HMI WECON DE 7 pulgadas).

Figura 20.

Prueba del sistema de aireación



- Ensamblaje sensores y PLC (sistema electrónico): Se ensambló sensores de temperatura y pH masa en el dispositivo para controlar el proceso de fermentación durante los siete días. Este procedimiento es parte fundamental de la construcción del sistema inteligente basado en deep learning, pues la detección y evaluación de las señales o datos emitidos por los sensores genera la autorregulación de la fermentación del cacao para obtener homogeneidad, a través de movimientos mecánicos automatizados (Figura 21). El PLC utilizado fue de tipo SIEMENS S7 1200 CPU1214.

Figura 21.

Ensamblaje del sistema eléctrico

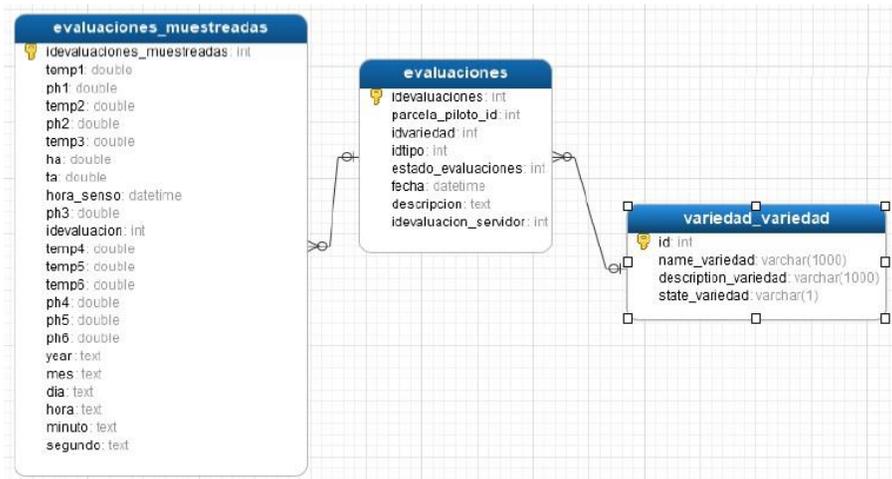


Fase 4. Desarrollo del sistema inteligente de control en tres etapas: base de datos y software web y construcción del modelo deep learning. Culminado el proceso de ensamblaje en sus tres niveles, se desarrolló el complemento del sistema inteligente de control basado en deep learning de acuerdo a las siguientes actividades:

- Base de datos y software web: Se realizó el análisis del modelo y la construcción de la base de datos en MySQL para el consolidado de los datos y el sistema de recolección local de microcomputadora. Se tomó la decisión de desarrollar el software web bajo la metodología de programación extrema, puesto que los requerimientos simplemente fueron la toma de datos y la vista de parámetros en tiempo real; es decir, el sistema de control no recibió tratamiento de usuarios externos, sino se encontró programado para monitoreo automático.

Figura 22.

Diseño de base de datos



- Construcción del modelo Deep Learning: El modelo de deep learning se realizó con el software R (lenguaje python), librerías KERAS y TensorFlow de licencia tipo GPU, en un ordenador independiente. Para la construcción se siguió los pasos de a continuación:
Lectura de datos: Se estableció la lectura de datos de acuerdo al formato presentado en la Figura 20.
Pre-procesamiento de los datos: En esta fase se realizó la limpieza de datos, las mismas que fueron verificados antes de su procesamiento. Asimismo, se convirtieron los datos de tipos caracteres en binario con el fin de mejorar y facilitar el procesamiento.

Entrenar el modelo: Para entrenar el modelo se tuvo lo siguiente: data en entrenamiento y data de test. Es decir, el procesamiento de la red neuronal con algoritmo backpropagation se realizó con data de entrenamiento, que conciernen a datos recolectados del fermentador del tipo de cacao clon CCN-51. El entrenamiento del modelo es la definición de las épocas(epocs) que hace el recorrido el algoritmo respecto a su ganancia y error (Figura 24). Enel Anexo 3 se muestra la codificación del modelo deep learning.

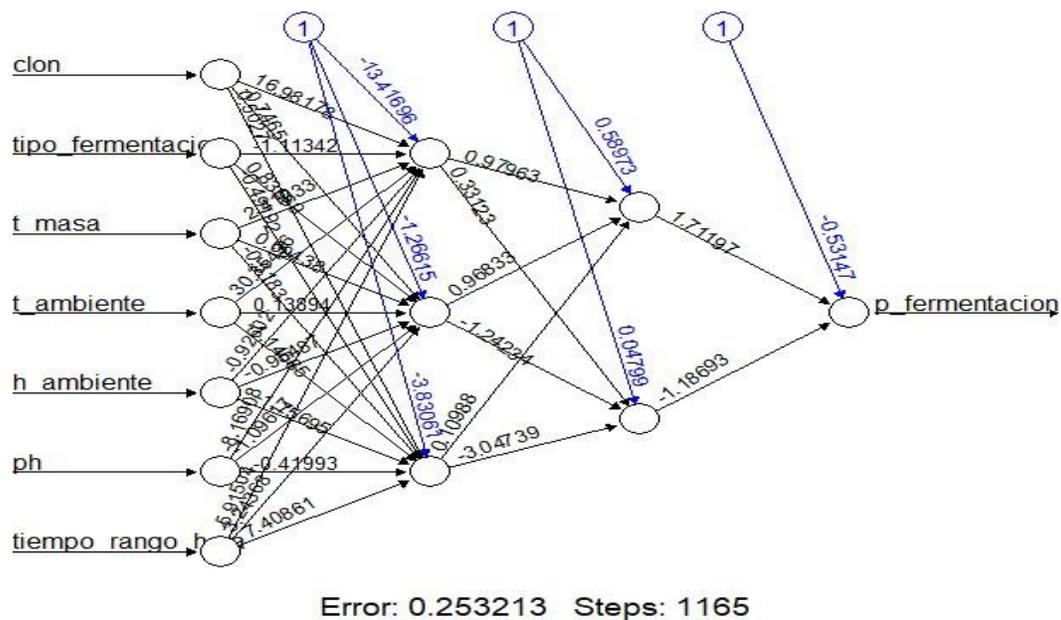
Figura 23.

Formato de lectura de datos

| clon | tipo_fermentacion | p_fermentacion | t_masa | t_ambiente | h_ambiente | ph | tiempo_rango_hora |
|------|-------------------|----------------|--------|------------|------------|------|-------------------|
| CC51 | DPC | 78 | 27.54 | 26.03 | 99.90 | 5.11 | 0 |
| CC51 | DPC | 78 | 28.53 | 26.11 | 99.69 | 5.09 | 1 |
| CC51 | DPC | 78 | 29.02 | 26.26 | 97.56 | 5.07 | 2 |
| CC51 | DPC | 78 | 29.57 | 26.51 | 93.14 | 5.04 | 3 |
| CC51 | DPC | 78 | 29.20 | 26.62 | 97.25 | 5.02 | 4 |
| CC51 | DPC | 78 | 29.10 | 27.18 | 99.65 | 5.02 | 5 |
| CC51 | DPC | 78 | 28.90 | 27.60 | 99.90 | 5.02 | 6 |
| CC51 | DPC | 78 | 28.83 | 28.09 | 99.90 | 5.02 | 7 |
| CC51 | DPC | 78 | 28.67 | 28.62 | 99.90 | 5.02 | 8 |
| CC51 | DPC | 78 | 28.82 | 29.21 | 99.90 | 5.02 | 9 |
| CC51 | DPC | 78 | 29.09 | 29.64 | 99.90 | 5.02 | 10 |

Figura 24.

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).

El error de es 0.25, el cual se sabe que tiene una aceptación de 0.75, siendo favorable para que el modelo sea corrido según experiencia siendo más del 60% el óptimo para ser entrenado y se ajusten a los valores en el proceso de fermentación de temperatura de masa respecto al tiempo.

Las fases 5 y 6 de la metodología fueron considerados en el siguiente subcapítulo.

3.1.3 Evaluación de la influencia del sistema inteligente de control basado en Deep learning en la regulación de la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda.

La validación de la hipótesis: 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 realizó a través de la observación técnica profesional de expertos en la producción de cacao, los cuales en base a sus conocimientos validaron la eficiencia del sistema según los criterios determinantes requeridos para el fermentador e indicadores estadísticos del porcentaje de fermentación de los granos.

Las fases expuestas en líneas posteriores responden el problema planteando:

Fase 5. *Instalación y pruebas del software en crudo en el dispositivo.* Se logró codificar el software basado en C para conectar los canales o puerto serial del PLC con la microcomputadora y almacenar los datos. El software central analizó los datos para ajustarlos al protocolo de fermentación. Esto fue empleado como base para programar las acciones del PLC. El sistema permitió asimismo visualizar los datos del dispositivo fermentador en tiempo real y enviarlos al servidor central.

Por otra parte, junto al panel de control, el fermentador integro botones que interrumpen o activan el paso de energía eléctrica para el proceso de fermentación (Figura 25).

Figura 25.

Panel de control del fermentador



En esta fase, los expertos en producción de cacao de la cooperativa validaron la funcionalidad del fermentador a través de la observación técnica profesional, quienes tuvieron como resultado la validación del cumplimiento de los criterios determinante del dispositivo en un 100%, demostrando la satisfacción sobre la eficacia del sistema inteligente de control basado en deep learning para la regulación del proceso de temperatura del grano de cacao.

Fase 6. Pruebas funcionales e informes técnicos. La fase final de la investigación, concluyó con las pruebas funcionales de trazabilidad del proceso de fermentación de manera tradicional y utilizando el sistema inteligente de control basado en deep learning (SICBD) articulado en el fermentador eléctrico-metal. En donde el reporte del séptimo día de fermentación del cacao arrojó lo siguiente:

Tabla 3.

Pruebas funcionales de trazabilidad

| Ítem | Clon | Tipo de fermentador | % Fermentación |
|------|-------|---------------------|----------------|
| 1 | CCN51 | Tradicional | 78 |
| 2 | CCN51 | SICBD | 79 |
| 3 | ICS95 | Tradicional | 75 |
| 4 | ICS95 | SICBD | 78 |

En la Tabla 3 se observa que el porcentaje de fermentación del grano de cacao mediante el SICBD fue superior a la forma tradicional en los diferentes tipos de clon de cacao. Teniendo como resultado mayor homogenización del proceso, con ello, garantía de calidad sensorial y organoléptica del grano.

Para demostrar estadísticamente que el SICBD regula la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda, se tomó como muestra el valor de 15 datos de trazabilidad de fermentación del cacao (tipo clon CCN51) del último día (siete) del proceso, dado a que son determinantes para evaluar la calidad del grano a partir de su porcentaje.

En este sentido, se aplicó la prueba no paramétrica de U Mann – Withney para muestras de dos grupos independientes en el software SPSS versión 26, ya que lo datos tuvieron una distribución no normal (Sig. < 0.05) tal como se muestra en la Tabla 4 con el estadístico de Shapiro-Wilk para muestras menores a 30.

Tabla 4.
Pruebas de normalidad

| | Tipo_Fermentación | Kolmogorov-Smirnov ^a | | | Shapiro-Wilk | | |
|----------------------------|-------------------|---------------------------------|----|------|--------------|----|------|
| | | Estadístico | gl | Sig. | Estadístico | gl | Sig. |
| Porcentaje de fermentación | Tradicional | ,225 | 15 | ,040 | ,881 | 15 | ,050 |
| | SICBD | ,283 | 15 | ,002 | ,801 | 15 | ,004 |

a. Corrección de significación de Lilliefors

En la Tabla 5 se observa el resumen de contraste de hipótesis. En la cual, se toma la decisión de rechazar la hipótesis nula: la distribución de porcentaje de fermentación es la misma entre categorías de tipo de fermentación. Con ello, tomamos la decisión de aceptar la hipótesis de investigación: 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; al presentar mayor homogenización de fermentación con un margen de error del 5%.

Tabla 5.
Resumen de contrastes de hipótesis

| | Hipótesis nula | Prueba | Sig. | Decisión |
|---|---|---|-------------------|----------------------------|
| 1 | La distribución de Porcentaje_Fermentación es la misma entre categorías de Tipo_Fermentación. | Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes | ,000 ^a | Rechace la hipótesis nula. |

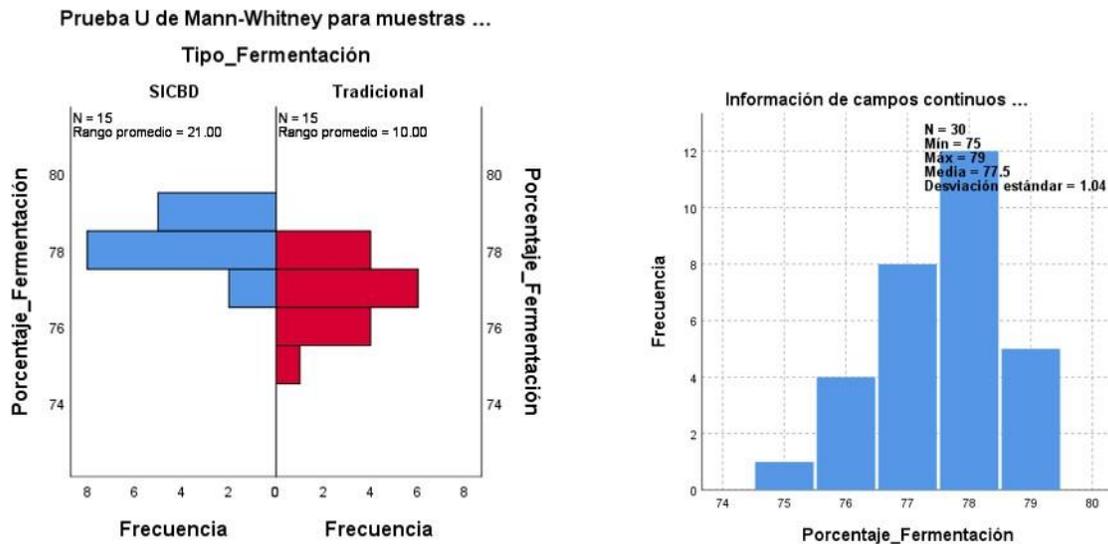
Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significación es de ,050.

a. Se muestra la significación exacta para esta prueba.

Finalmente, se determinó que el rango promedio de fermentación con el SICDB fue de 21 y de forma tradicional se obtuvo un valor de 10. Además, se identificó el rango mínimo del porcentaje de fermentación de 75% y máximo de 79%, con una media de 77.5% y desviación estándar de 1.04 (Figura 26). Estos datos son muy cercanos al porcentaje óptimo de fermentación (80%) requerido en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. Por ende, se reconoce la eficacia de sistema en el proceso de fermentación y su utilidad pertinente para lograr cumplir estándares de calidad exigidos en el mercado internacional para su comercialización.

Figura 26.

Gráficos estadísticos de prueba U de Mann-Whitney



3.2. Discusión

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 microorganismos, pues los materiales con los que se encuentren contruidos 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) y (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) y (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.

CONCLUSIONES

Se logró formular un protocolo basado en parámetros básicos estandarizados de temperatura para el proceso de fermentación del grano de cacao según fuentes de información científica confiable. Estas estuvieron complementadas con las recomendaciones y experiencia del equipo técnico experto de producción de cacao de la cooperativa. El protocolo fue parte fundamental para la construcción del sistema inteligente de control ya que determina las acciones que el fermentador debe realizar para la regulación.

Se diseñó y construyó un sistema inteligente de control basado en deep learning para regular la temperatura del proceso de fermentación. Esta se efectuó en seis fases, cada una complementaria para lograr robustez y eficacia en la fermentación del grano de cacao. Para ello, se elaboró una matriz de criterios determinantes y se propusieron tres modelos de fermentadores que una vez seleccionado el prototipo final se realizaron actividades de ensamblaje en niveles: eléctrico, mecánico, desarrollo de software y entrenamiento del modelo deep learning.

Se logró evaluar la influencia del sistema inteligente de control basado en deep learning en la regulación de temperatura mediante la técnica estadística de U-Mann Whitney con datos provenientes de la trazabilidad del proceso de fermentación del grano de cacao de forma tradicional y mediante el sistema inteligente, obteniendo como resultado una influencia positiva con Sig. 0.00 a un nivel de significancia del 5%.

Se concluye aceptando la hipótesis planteada: 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, esto a través de un fermentador de acero inoxidable con partes eléctricas y mecánicas, siendo el promedio del porcentaje fermentación 79%, la cual es muy cercano al valor óptimo de 80% y significativo del valor promedio del método tradicional 75% de fermentación.

RECOMENDACIONES

Se recomienda a la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda profundizar la evaluación del protocolo formulado con especialistas profesionales en el área de producción de cacao. Esto con el fin de verificar o estudiar la influencia de otros parámetros básicos que puedan asociarse a la calidad sensorial del cacao y ser actualizado en el sistema inteligente de control.

Por otra parte, se recomienda a la cooperativa apoyar en investigaciones de otros procesos de cosecha y poscosecha del cacao, ya que como se evidencia, la automatización tecnológica trastra beneficios y ventajas para asegurar la calidad de los granos y que estos puedan ser comercializados a nivel nacional e internacional con precios justos, y al mismo tiempo los productores satisfagan sus necesidades.

Asimismo, se recomienda la inversión en la construcción de sistemas inteligentes de control basado en tecnología deep learning para cumplir con las demandas exigidas actualmente. Así como, continuar con el entrenamiento del algoritmo de deep learning propuesto para lograr porcentajes de fermentación de cacao superiores al 80%.

Finalmente, recomendamos a la gerencia de la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda, brindar capacitación permanente a los productores de cacao y al personal técnico operativo encargado de los módulos de fermentación. Esto con el propósito de asegurar el manejo adecuado del sistema inteligente de control para asegurar la homogeneización de los granos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, H. (2017). *Guía de Buenas Prácticas de Poscosecha de Cacao*.
http://v2.fhia.info/downloads/cacao_pdfs/Guia_buenas_practicas_de_poscosecha_de_cacao.pdf
- Agus, B. A. P., Mohamad, N. N., & Hussain, N. (2018). Composition of unfermented, unroasted, roasted cocoa beans and cocoa shells from Peninsular Malaysia. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *12*, 2581-2589.
<https://doi.org/10.1007/s11694-018-9875-4>
- Ali, D., & Frimpong, S. (2020). Artificial intelligence, machine learning and process automation: existing knowledge frontier and way forward for mining sector. *Artificial Intelligence Review*, *53*, 6025-6042. <https://doi.org/10.1007/s10462-020-09841-6>
- Almeida-Pozo, L. C., Caicedo Reyes, J. I., Escobar-Guachambala, M. Á., & Pazmiño-Armijos, A. O. (2020). Diseño mecánico de 24 prototipos de prótesis de mano escalables para niños de 6 a 12 años utilizando Software CAD. *Polo del Conocimiento*, *5*(12), 39-57.
<https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/2033/4054>
- Amasha, M. A., Areed, M. F., Khairy, D., Atawy, S. M., Alkhalaf, S., & Abougalala, R. A. (2020). Development of a Java-based Mobile application for mathematics learning. *Education and Information Technologies*, *26*(1), 945-964.
<https://doi.org/10.1007/s10639-020-10287-0>
- 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>
- 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>

- Bessaoudi, M., Belahcene, M., Ouamane, A., Chouchane, A., & Bourennane, S. (2019). Multilinear Enhanced Fisher Discriminant Analysis for robust multimodal 2D and 3D face verification. *Applied Intelligence*, 49, 1339-1354. <https://doi.org/10.1007/s10489-018-1318-8>
- Castro-Rivera, V. P., Herrera-Acuña, R. A., & Villalobos-Abarca, M. A. (2020). Desarrollo de un software web para la generación de planes de gestión de riesgos de software. *Información tecnológica*, 31(3), 135-148. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642020000300135>
- Chartrand, G., Cheng, P. M., Vorontsov, E., Drozdal, M., Turcotte, S., Pal, C. J., Kadoury, S., & Tang, A. (2017). Deep Learning: A Primer for Radiologists. *RadioGraphics*, 37(7), 2113-2131. <https://doi.org/10.1148/rg.2017170077>
- 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>
- Cruz del Castillo, C., Olivares Orozco, S., & González García, M. (2014). *Metodología de la investigación* (G. E. P. S. . de C.V (ed.)). México. <https://books.google.com.ec/books?id=8uLhBAAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- Gabbay Alves, T. V., Silva da Costa, R., Aguiar Gomes, A. T., Ferreira da Costa, C. E., Perego, P., Carréra Silva Júnior, J. O., Converti, A., & Ribeiro Costa, R. M. (2018). Quality control of Amazonian cocoa (*Theobroma cacao* L.) by-products and microencapsulated extract by thermal analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 134, 993-1000. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7300-1>
- Gómez Borges, I. M., Acosta Corzo, A. V., & Fundora Curbelo, Y. (2020). Programación de un controlador lógico difuso en un PLC M241: Aplicación práctica a un túnel de lavado industrial de textil. *Revista Cubana de Ciencias Informáticas*, 14(3), 105-125. http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2227-18992020000300105&script=sci_arttext&tlng=pt

- González Filgueira, G., & Rodríguez Permy, F. J. (2018). Automatización de una planta industrial de alimentación mediante control distribuido. *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, 27, 1-17. <https://doi.org/10.17013/risti.27.1-17>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta edic). https://www.academia.edu/38885436/Hernández_Fernández_y_Baptista_2014_Metodología_de_la_Investigación
- Horna Martinez, L. M., & Diaz Cercado, C. K. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo automatizado para el proceso de conchado de chocolate en la empresa Industrias Sol Norteño - Jaén - Perú*. [Universidad Nacional de Jaén]. <http://repositorio.unj.edu.pe/handle/UNJ/164>
- 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>
- Huayama Sopla, P. M., & Siche, R. (2020). Efecto de la variedad, frecuencia de remoción y tiempo de fermentación en el rendimiento y calidad de granos de cacao, evaluado mediante visión computacional. *Agroindustrial Science*, 10(3), 287-292. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/agroindscience/article/view/3230>
- INIA. (2019). *Sistematización de los subproyectos de cacao financiados por el Instituto Nacional de Innovación Agraria a través del Programa Nacional de Innovación Agraria*. <https://www.pnia.gob.pe/wp-content/uploads/2019/06/cacao.pdf>
- Ipanaque, W., Belupu, I., Castillo, J., & Salazar, J. (2017). Internet of Things applied to monitoring fermentation process of Cocoa at the Piura's mountain range. *2017 CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/CHILECON.2017.8229532>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147(February), 70-90.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>

- Kannan, S. (2019). Smart process measurement and automation: challenges, solution and future direction. *CSI Transactions on ICT*, 7, 93-98. <https://doi.org/10.1007/s40012-019-00238-7>
- 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>
- Li, H., Ota, K., & Dong, M. (2018). Learning IoT in Edge: Deep Learning for the Internet of Things with Edge Computing. *IEEE Network*, 32(1), 96-101. <https://doi.org/10.1109/MNET.2018.1700202>
- López Cuadra, Y. M., Cunias Rodríguez, M. Y., & Carrasco Vega, Y. L. (2020). El cacao peruano y su impacto en la economía nacional. *Revista Universidad y Sociedad*, 12(3), 344-352. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202020000300344&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- López de la Teja, L. J., Sarría Stuart, Á., & Fernández Álvarez, D. (2017). La formación de conceptos en el proceso de enseñanza-aprendizaje de los sistema de gestión de base de datos. *Revista Conrado*, 13(57), 139-145. <https://conrado.ucf.edu.cu/index.php/conrado/article/view/451/486>
- 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.

<http://revistas.inia.gob.pe/index.php/REVINIA/article/view/1>

Meneses Rocha, M. E. (2018). Grandes datos, grandes desafíos para las ciencias sociales.

Revista mexicana de sociología, 80(2), 415-444.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-25032018000200415&lng=en&tlng=en#?

Montes de Oca, L. T., Nogueira Rivera, D., & Medina León, A. (2018). Exigencias y limitaciones de los sistemas de información para el control de gestión organizacional.

Revista Universidad y Sociedad, 10(1), 8-14.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2218-36202018000100008&script=sci_arttext&tlng=en

Nivia Vargas, A. M., & Jaramillo Jaramillo, I. (2018). La industria de sensores en Colombia. *Tecnura*, 22(57), 44-54. <https://doi.org/10.14483/22487638.13518>

Parra, P., Castillo, O., & Maldonado, P. (2019). Alternative method for the fermentation of cocoa beans. *2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*.

<https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2018.8609760>

Peñalba Achurra, V., Cedeño M., Y., & Gomez Cedeño, M. (2019). Management of the Cocoa Supply Chain and Its Relationship in Sustainable Development: A Theoretical Model. *2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC)*, 491-496. <https://doi.org/10.1109/IESTEC46403.2019.00094>

Pimienta, J., & de la Orden, A. (2017). *Metodología de la investigación* (Perason Educación de México (ed.); Tercera Ed).

Pouyanfar, S., Sadiq, S., Yan, Y., Tian, H., Tao, Y., Reyes, M. P., Shyu, M.-L., Chen, S.-C., & Iyengar, S. S. (2018). A Survey on Deep Learning: Algorithms, Techniques, and Applications. *ACM Computing Surveys*, 51(5), 92. <https://doi.org/10.37896/sr7.8/037>

Procomer. (s. f.). Manual técnico poscosecha de cacao fino y de aroma. En *Promotora del Comercio Exterior de Costa Rica*. <https://www.procomer.com/wp-content/uploads/Manual-poscosecha-de-cacao-fino-y-de-aroma.pdf>

- 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>
- Rios Jara, J. G. (2020). Importancia de los dispositivos usados en la fermentación de Cacao ("Theobroma cacao L"). *Universidad Peruana Unión*. <http://repositorio.upeu.edu.pe/handle/UPEU/3905>
- Rodríguez Silva, J. L. Á. (2019). ¿Qué puede hacer el software R para resolver tus problemas? *Revista Digital Universitaria*, 20(3), 1-10. <https://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n3.a5>
- 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]. <http://hdl.handle.net/11458/3555>
- UOC. (s. f.). *Espacio de recursos de ciencia de datos*. Universitat Oberta de Catalunya. <http://datascience.recursos.uoc.edu/es/keras-tensorflow/>
- 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]. <http://hdl.handle.net/11458/2550%0A>

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

| Formulación del problema | Objetivos | Hipótesis | Técnica e Instrumentos |
|---|--|---|--|
| <p>Problema general ¿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?</p> | <p>Objetivo general Controlar y regular la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao basado en parámetros básicos estandarizados en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>a) Formular un protocolo basado en parámetros básicos estandarizados de temperatura para el proceso de fermentación del grano de cacao.</p> <p>b) Construir sistema inteligente de control basado en Deep learning para regular la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda basado en parámetros básicos estandarizados.</p> <p>c) Evaluar la influencia del sistema inteligente de control basado en Deep learning para regular la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda.</p> | <p>Hipótesis general 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.</p> | <p>Técnica Deep learning</p> <p>Instrumentos Base de datos</p> |

| Diseño de investigación | Población y muestra | Variables y dimensiones | | | | | | | | | | | |
|--|--|---|-----------|-------------|--|-----------|----------------------------------|------------|-----------------------------|-------------|-----------------|---------|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - Tipo aplicada - Enfoque cuantitativo - Alcance explicativo - Método hipotético – deductivo - Diseño experimental | <p>La población del estudio será el total de cacao de tipo clon CNN que se acopie durante la ejecución del proyecto en la Cooperativa Agraria Allima Cacao Ltda. La muestra será 150 kg de cacao en baba alojadas en el dispositivo electromecánico, lo cual permitirá experimentar el sistema inteligente de control basado en Deep learning para la regulación de la temperatura del proceso de fermentación del grano de cacao.</p> | <table border="1"> <thead> <tr> <th data-bbox="1119 277 1331 313">Variables</th> <th data-bbox="1331 277 1650 313">Dimensiones</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="1119 313 1331 456">Sistema inteligente de control basado en Deep learning</td> <td data-bbox="1331 313 1650 456">Presencia</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1119 456 1331 529">Regulación de la temperatura del</td> <td data-bbox="1331 456 1650 529">Frecuencia</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1119 529 1331 602">proceso de fermentación del</td> <td data-bbox="1331 529 1650 602">Temperatura</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1119 602 1331 654">grano de cacao.</td> <td data-bbox="1331 602 1650 654">Tiempos</td> </tr> </tbody> </table> | Variables | Dimensiones | Sistema inteligente de control basado en Deep learning | Presencia | Regulación de la temperatura del | Frecuencia | proceso de fermentación del | Temperatura | grano de cacao. | Tiempos | |
| Variables | Dimensiones | | | | | | | | | | | | |
| Sistema inteligente de control basado en Deep learning | Presencia | | | | | | | | | | | | |
| Regulación de la temperatura del | Frecuencia | | | | | | | | | | | | |
| proceso de fermentación del | Temperatura | | | | | | | | | | | | |
| grano de cacao. | Tiempos | | | | | | | | | | | | |

Anexo 2: Fotografías del ensamble del SICBD





Anexo 3: Codificación del modelo Deep Learning

```

library(keras)
library(lime)
library(lubridate)
library(zoo)
library(tidyquant)
library(rsample)
library(recipes)
library(yardstick)
library(corr)
library(readr)
library(dplyr)
library(tidyverse)
library(caret)
#extracion de datos
data_cacao <- read_csv("C:/Users/USUARIO/Documents/sites/efix_cocoa/train_data.csv")
data_cacao2 <- read_csv("C:/Users/USUARIO/Documents/sites/efix_cocoa/test_data.csv")
#paso 3:asignar las datas al entramiento y prueba
index_train <- createDataPartition(data_cacao$p_fermentacion, p = 0.90, list = FALSE)
index_test <- createDataPartition(data_cacao2$p_fermentacion, p = 0.45, list = FALSE)
train_tbl <- data_cacao[index_train, ]
test_tbl <- data_cacao[-index_train, ]
view(train_tbl)
view(test_tbl)
#paso 04, convertir las textas en numericas
#paso 05: creacion de la receta, definicon de entradas y salidas
rec_obj <- recipe(p_fermentacion ~ ., data = train_tbl) %>%
step_discretize(h_ambiente, options = list(cuts = 6)) %>%
step_log(t_masa) %>%
step_dummy(all_nominal(), -all_outcomes()) %>%
step_center(all_predictors(), -all_outcomes()) %>%
step_scale(all_predictors(), -all_outcomes()) %>%
prep(data = train_tbl)
rec_obj
#paso 06: procesamiento de la receta
x_train_tbl <- bake(rec_obj, new_data = train_tbl) %>% select(p_fermentacion)
x_test_tbl <- bake(rec_obj, new_data = test_tbl) %>% select(-p_fermentacion)
glimpse(x_train_tbl)
glimpse(x_test_tbl)
#paso 07 agregamos yes:1 y no:0 como datos binarios para procesar
y_train_vec <- pull(train_tbl, p_fermentacion)
y_test_vec <- pull(test_tbl, p_fermentacion)
# paso 08: generamos la red neuronal

```

```

model_keras <- keras_model_sequential()
model_keras %>%
# First hidden layer
layer_dense(
units = 16,
kernel_initializer = "uniform",
activation = "relu",
input_shape = ncol(train_tbl)) %>%
# Dropout to prevent overfitting
layer_dropout(rate = 0.1) %>%
# Second hidden layer
layer_dense(
units = 16,
kernel_initializer = "uniform",
activation = "relu") %>%
# Dropout to prevent overfitting
layer_dropout(rate = 0.1) %>%
# Output layer
layer_dense(
units = 1,
kernel_initializer = "uniform",
activation = "sigmoid") %>%
# Compile ANN
compile(
optimizer = 'adam',
loss = 'binary_crossentropy',
metrics = c('accuracy')
)
keras_model
history <- fit(
object = model_keras,
x = as.matrix(train_tbl),
y = y_train_vec,
batch_size = 32,
epochs = 25,
validation_split = 0.2
)
print(history)
plot(history)
#paso 8: predicciones
yhat_keras_class_vec <- predict_classes(object = model_keras, x = as.matrix(test_tbl)) %>%
as.vector()
# Predicted Class Probability
yhat_keras_prob_vec <- predict_proba(object = model_keras, x = as.matrix(test_tbl)) %>%
as.vector()
#testeo y predicciones con los training
estimates_keras_tbl <- tibble(
truth = as.factor(y_test_vec),
estimate = as.factor(yhat_keras_class_vec),
class_prob = yhat_keras_prob_vec
)

```

```

estimates_keras_tbl
options(yardstick.event_first = FALSE)
estimates_keras_tbl %>% conf_mat(truth, estimate)
estimates_keras_tbl %>% metrics(truth, estimate)
estimates_keras_tbl %>% roc_auc(truth, class_prob)
tibble(
  precision = estimates_keras_tbl %>% precision(truth, estimate),
  recall = estimates_keras_tbl %>% recall(truth, estimate)
)
estimates_keras_tbl %>% f_meas(truth, estimate, beta = 1)
class(model_keras)
model_type.keras.models.Sequential <- function(x, ...) {
  "classification"
}
predict_model.keras.models.Sequential <- function(x, newdata, type, ...) {
  pred <- predict_proba(object = x, x = as.matrix(newdata))
  data.frame(Yes = pred, No = 1 - pred)
}
x_test_tbl
library(lime)
predict_model.keras.models.Sequential(x = model_keras, newdata = x_test_tbl, type = 'raw') %>%
  tibble::as_tibble()
explainer <- lime::lime(
  x = x_train_tbl,
  model = model_keras,
  bin_continuous = FALSE
)
explanation <- lime::explain(
  x_test_tbl[1:10, ],
  explainer = explainer,
  n_labels = 1,
  n_features = 4,
  kernel_width = 0.5
)

```