

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS



“DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE CACAO
CRIOLLO (*Theobroma cacao L.*) FERMENTADO
MEDIANTE VISIÓN COMPUTACIONAL”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
DE INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Autora: Bach. CARLA GUIANELLA SAMANIEGO LALANGUI

Asesor: Mg. POLITO MICHAEL HUAYAMA SOPLA

JAÉN – PERÚ, FEBRERO, 2020



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ley de Creación N° 29304

Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo N° 002-2018-SUNEDU/CD

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 12 de febrero del año 2020, siendo las 12:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

Presidente: Dra. Irma Rumela Aguirre Zaquinaula

Secretario: Mg. Noly Cristóbal Vilchez Parra

Vocal: Mg. Wagner Colmenares Mayanga, para evaluar la Sustentación del Informe Final:

- () Trabajo de Investigación
() Tesis
() Trabajo de Suficiencia Profesional

Titulado:

Determinación de la calidad de cacao criollo (Theobroma cacao L.) fermentado mediante visión computacional

presentado por la Bachiller Carla Guianella Samaniego Lalanguí de la Carrera Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

- () Aprobar () Desaprobar () Unanimidad () Mayoría


Con la siguiente mención:

- | | | |
|----------------|------------|---------------|
| a) Excelente | 18, 19, 20 | () |
| b) Muy bueno | 16, 17 | (<u>16</u>) |
| c) Bueno | 14, 15 | () |
| d) Regular | 13 | () |
| e) Desaprobado | 12 ó menos | () |

Siendo las 12:55 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.



Presidente



Secretario



Vocal

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
ÍNDICE GENERAL.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	v
ÍNDICE DE GRÁFICA.....	vi
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	5
III. MATERIAL Y MÉTODOS.....	6
3.1. Análisis fisicoquímico de los granos de cacao.....	9
3.1.1. Determinación de la acidez total.....	9
3.1.2. Determinación del pH.....	10
3.1.3. Determinación de humedad.....	10
3.2. Análisis mediante visión computacional.....	11
3.3. Diseño estadístico.....	13
IV. RESULTADOS.....	14
V. DISCUSIÓN.....	25
VI. CONCLUSIONES.....	27
VII. RECOMENDACIONES.....	28
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29
AGRADECIMIENTO.....	32
DEDICATORIA.....	32
ANEXOS.....	33

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Valor de las variables a evaluar con el diseño estadístico de Box-Behnken..	12
Tabla 2: Diseño estadístico de Box-Behnken	12
Tabla 3: Análisis fisicoquímico del cacao criollo fresco.....	14
Tabla 4: Diseño estadístico de Box-Behnken y VC.....	15
Tabla 5: Coeficiente de regresión obtenida con el software Statgraphics.....	16
Tabla 6: Efectos estimados de pH, obtenidos con software Statgraphics.....	16
Tabla 7: Análisis de varianza para pH obtenidos con Statgraphics.....	17
Tabla 8: Valores óptimos de las variables independientes (Maximizar pH).....	18
Tabla 9: Valores óptimos de las variables independientes (Minimizar pH).....	18
Tabla 10: Valores óptimos de las variables independientes (Valor óptimo 5.2)...	18
Tabla 11: ANOVA adicional para variables en el orden ajustado.....	33
Tabla 12: pH vs Tiempo de fermentación.....	33
Tabla 13: % Acidez vs Tiempo de fermentación.....	34
Tabla 14: L* vs Tiempo de fermentación.....	34
Tabla 15: a* vs Tiempo de fermentación.....	35
Tabla 16: b* vs Tiempo de fermentación.....	35
Tabla 17: Lx* vs Tiempo de fermentación.....	35
Tabla 18: ax* vs Tiempo de fermentación.....	36
Tabla 19: bx* vs Tiempo de fermentación.....	36
Tabla 20: % de humedad a dos días de iniciada la fermentación.....	36
Tabla 21: % humedad de acuerdo al diseño estadístico de Box-Behnken.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Diagrama de flujo para obtener granos de cacao fermentado.....	9
Figura 2: Ventana de inicio del software weka.....	20
Figura 3: Archivo.arff con los once atributos cargados en weka.....	21
Figura 4: Selección de atributos que influyen en el pH.....	21

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1: Diagrama de pareto estandarizada para pH.....	19
Gráfica 2: Efectos principales para pH.....	19
Gráfica 3: Superficie de respuesta estimada en función del estado de madurez.....	19
Gráfica 4: Superficie de respuesta estimada en función del tiempo de fermentación.	20
Gráfica 5: Superficie de respuesta estimada en función de la frecuencia de remoción...	20
Gráfica 6: pH vs Tiempo de fermentación.....	23
Gráfica 7: % Acidez vs Tiempo de fermentación.....	23
Gráfica 8: L*a*b* vs Tiempo de fermentación.....	24
Gráfica 9: Lx*ex*bx* vs Tiempo de fermentación.....	24

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1: Cosecha y clasificación del cacao criollo.....	6
Fotografía 2: Clasificación de frutos verde, pintón y maduro de cacao criollo.....	6
Fotografía 3: Cortado de la mazorca de cacao con la finalidad de extraer la semilla..	7
Fotografía 4: Acondicionamiento de los cajones de fermentación.....	7
Fotografía 5: Medida de temperatura y remoción de la fermentación del cacao.....	8
Fotografía 6: Toma de imagen mediante visión computacional.....	8
Fotografía 7: Secado de las muestras de cacao a temperatura ambiente y almacenado...	9
Fotografía 8: Determinación de la acidez de granos de cacao fermentados.....	10
Fotografía 9: Determinación del pH de granos de cacao fermentados.....	10
Fotografía 10: Determinación de la humedad de granos de cacao fermentados.....	11
Fotografía 11: Algoritmo y análisis de imagen en el Matlab.....	11
Fotografía 12: Fermentación de cacao criollo en cajones de madera	38
Fotografía 13: Remoción de los granos de cacao criollo.....	38
Fotografía 14: Medición de la temperatura.....	38
Fotografía 15: Determinación del % de acidez de los granos triturados de cacao...	38
Fotografía 16: Determinación del pH de los granos triturados de cacao.....	38
Fotografía 17: Determinación de humedad mediante el método de la estufa.....	39
Fotografía 18: Granos de cacao enteros y partidos (visión computacional).....	39
Fotografía 19: Secado de los granos de cacao.....	39
Fotografía 20: Cajones de cacao fermentado a los tres días.....	39
Fotografía 21: Cajones de cacao fermentado a los cinco días.....	39
Fotografía 22: Cajones de cacao fermentado a los 7 días.....	40
Fotografía 23: Desarrollo de la investigación en el laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Carrera Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Jaén.....	40

RESUMEN

Se determinó la calidad de cacao criollo (*Theobroma cacao L.*) fermentado mediante visión computacional, en función de las variables: Estado de madurez (verde, pintón y maduro), frecuencia de remoción (12, 24 y 36 horas) y días de fermentación (3, 5 y 7 días) con 15 tratamientos. Se depositó 1 kg de granos de cacao en cada cajón de madera empleándose 15 kg de cacao criollo según el diseño estadístico de Box–Behnken a los granos frescos y fermentados se realizó los análisis fisicoquímicos de pH, acidez titulable y visión computacional, se tomó las imágenes con una cámara digital (celular: SONY XPERIA ULTRA) de 21 MP con acceso a PC a las muestras en grano entero y partido y fueron analizadas en Matlab. Los resultados se analizaron con Statgraphics Centurion XVI.I optimizando: pH 5.2, estado de madurez pintón, frecuencia de remoción 30 horas y tiempo de fermentación 3 días; también se determinó las variables influyentes en el pH como son: la frecuencia de remoción, días de fermentación, L^* (grano entero), bx^* (grano partido), analizados con el software weka. Concluyendo que el mejor tratamiento es el nueve: pH de 5.2, acidez 0.80, estado de madurez maduro, frecuencia de remoción cada 12 h, una fermentación de 3 días y las coordenadas de visión computacional para grano entero $L^*=88.90$, $a^*=7.52$ y $b^*=38.15$ y para grano partido $Lx^*=84.16$, $ax^*=25.92$ y $bx^*=2.97$.

Palabras clave: fermentación, visión computacional, cacao criollo.

ABSTRACT

The quality of Creole cocoa (*Theobroma cacao* L.) fermented by computational vision was determined, based on the variables: Maturity status (green, pinon and ripe), removal frequency (12, 24 and 36 hours) and days of fermentation (3, 5 and 7 days) with 15 treatments. 1 kg of cocoa beans were deposited in each wooden crate using 15 kg of Creole cocoa according to the statistical design of Box – Behnken to fresh and fermented grains, physicochemical analyzes of pH, titratable acidity and computational vision were performed. Images with a digital camera (cellular: SONY XPERIA ULTRA) of 21 MP with access to PC to the samples in whole and broken grain and were analyzed in Matlab. The results were analyzed with Statgraphics Centurion XVI.I optimizing: pH 5.2, maturity status, extraction frequency 30 hours and fermentation time 3 days; the influencing variables in the pH were also determined, such as: the frequency of extraction, the days of fermentation, L^* (whole grain), bx^* (broken grain), analyzed with the Weka software. Concluding that the best treatment is nine: pH 5.2, acidity 0.80, mature maturity, removal frequency every 12 h, a 3-day fermentation and computational vision coordinates for whole grain $L^*= 88.90$, $a^*= 7.52$ y $b^*= 38.15$ and for split grain $Lx^*= 84.16$, $ax^*= 25.92$ and $bx^*= 2.97$.

Keywords: fermentation, computational vision, Creole cocoa.

I. INTRODUCCIÓN

(Geographic, 2020), reconoció al cacao de Piura como el mejor del mundo, indicó que existen cuatro denominaciones de cacao blanco con unos matices y sabores diferentes, permite distinguir en boca sus notas cítricas y afrutadas con matices a frutos secos. Se trata de un chocolate menos amargo y menos ácido que contiene antocianinas, un pigmento hidrosoluble responsable del color púrpura de la semilla de su interior, calificado así como uno de los 50 mejores granos de cacao a nivel mundial en el salón del cacao y el chocolate de París.

En la obtención de cacao seco, los granos son sometidos a fermentación y para medir su eficiencia, existen métodos de evaluación conocido como la prueba de corte y el cálculo del índice de fermentación. Un grano de cacao bien fermentado se caracteriza por ser de color marrón y puede ser de diferente tonalidad, desde claro hasta oscuro. También posee estrías y/o hendiduras internas muy pronunciadas; sin embargo, estos métodos, ampliamente usado a nivel mundial, tiene una desventaja: Es una medida subjetiva que evalúa de manera cualitativa las características físicas como la porosidad y el color interno del grano, con la consecuente variabilidad en el resultado. (Rivera, 2018)

Solo con un proceso de fermentación controlado y parejo se puede obtener cacao de alta calidad que hoy en día demanda el mercado nacional e internacional, ya que la fermentación inadecuada se ve afectada por varios factores entre ellos; la calidad de la semilla que se utilizó, el proceso de fermentación, desarrollo de microorganismos entre otros, siendo los principales factores causante de la baja calidad del cacao: El inadecuado control del tiempo, temperatura y frecuencia de remoción. La fermentación es una fase indispensable en el beneficio del cacao, ya que en ella se desarrollan los precursores del aroma y sabor a chocolate. Sin embargo esta etapa es afectada por el tipo de cacao, tiempo de almacenamiento del fruto, método de fermentación, tipo de fermentación, tiempo del proceso y frecuencia de remoción (Ortiz, *et al.*, 2009), lo que concuerda con (Gutiérrez, 2012), que la fermentación también está afectada por el origen genético del cacao, intervalo

entre cosechas, cantidad de cacao a fermentar, cantidad de pulpa en la semilla, el método de fermentación y las condiciones del medio donde se realiza el proceso.

El proceso de fermentación se realiza tradicionalmente usando distintos sistemas: canastos, cajones plásticos, cajones de madera, cajas de madera escalonada seriadas, apilados y generalmente cubiertos con hojas de musácea, etc. (Álvarez, *et al.*, 2010). El tiempo de fermentación está relacionado con el tipo de cacao. El criollo fermenta más rápidamente que el forastero, tardando el primer tipo de cacao de 2 a 3 días y el segundo de 5 a 7 días. (Ortiz, *et al.*, 2009). En concordancia con (Utami, *et al.*, 2015) la fermentación se divide en dos grupos, fermentación 2-3 días con granos de cacao criollo y de 6-8 días cacao forastero.

La fermentación involucra dos fenómenos distintos, primero una fermentación microbiana que contribuye a la eliminación de la pulpa mucilaginoso presente en las almendras y segundo, induce a un conjunto de reacciones bioquímicas internas en los cotiledones que conducen a la modificación de la composición química de las almendras y en particular a la formación de los precursores del aroma (Gutiérrez, 2012).

Al fermentar los granos, el color cambia a una tonalidad parda, que difiere entre los tipos, el cual es producido por la hidrólisis de la antocianina la posterior oxidación de las agliconas resultantes a compuestos quinónicos, los cuales contribuyen al color pardo característico de un cacao fermentado, en el secado el color varía, debido a la formación de los pigmentos marrones producidos por las reacciones de condensación proteína-quinona ocurridas después de la oxidación enzimática de los polifenoles, como en el caso de las leucocianidinas y las epicatequinas (Álvarez, *et al.*, 2010).

(Braudeau, 1970) manifiesta que en la fermentación del cacao, la pulpa es descompuesta por acción microbiana, lo que ocasiona ruptura de células y desprendimientos de jugos disminuyendo la humedad de los granos. (Nogales *et al.*, 2006) reportó 52,44 % de humedad para el cacao criollo fermentado por cinco días en dos diseños de caja. Asimismo (Amores, 2009) menciona que al completarse la fermentación, las almendras terminan con alrededor del 55% de humedad.

El aumento de la temperatura cumple un importante función sobre la masa de cacao durante la fermentación, siendo este aumento ocasionado por las reacciones exotérmicas en el grano y el aumento de la actividad microbiana (Álvarez, *et al.*, 2010); también señaló que el aumento de la temperatura era responsable por una parte, de la muerte del embrión y del

inicio de las reacciones enzimática en los tejidos del cotiledón, dando origen a los precursores de sabor y aroma a chocolate. (Gutiérrez, 2012); estas reacciones son inducidas por elevación de la temperatura de la masa de cacao durante la fermentación y a la migración del ácido acético de la pulpa hacia la almendra, asimismo estos dos fenómenos suprimen el poder germinativo del embrión. Es por ello que en una reacción exotérmica, la actividad microbiana dará lugar a un aumento de la temperatura en la fermentación en caja. (Utami, *et al.*, 2015).

Las comunidades microbianas asociadas con los granos de cacao en procesos finales se componen principalmente de *Acetobacter* y *Lactobacillus* géneros más abundantes en las muestras de estudio. (Bortolini, *et al.*, 2016). Los granos de cacao fermentados se hacen posible por una sucesión de microorganismo como levaduras, bacterias de ácido láctico, y bacterias de ácido acético que viene desde el entorno. (Illegheems, *et al.*, 2016).

Los chocolates son alimentos de un alto poder energético, ya que están compuestos de grasas, hidratos de carbono y proteínas, por ello, generalmente se incluyen en desayunos y meriendas. Otros elementos que nos aporta el cacao y sus derivados son las vitaminas (tiamina o B1 y ácido fólico) y minerales como el potasio, fósforo y magnesio. (Agell, 2013). El componente más importante es el componente graso, el cual es ampliamente usado en la industria chocolatera, farmacéutica y de cosméticos. (Zlatko, Garzaro, & Guerra C, 1998).

El cacao fermentado con un pH entre 5,5 - 5,8 es considerado como pobremente fermentado, mientras que un cacao con un pH entre 4,7 - 5,2 se considera que ha sido fermentado adecuadamente (García, 2018). Según Enríquez (1985), Jinap, citado por Recalde (2007) y Hernández, citado por Sánchez (2007), mencionan que el pH inicial de los cotiledones es de 6.6 y el de la pulpa varía de 3.4 a 4.6 asimismo, Wood, citado por Sánchez (2007), menciona que por acción del ácido acético al tercer día el pH baja a 4,8 y se mantiene durante el resto de la fermentación debido a la permeabilidad de la testa, dato confirmado por Jinap, citado por Recalde (2007), quien menciona que después de la fermentación el rango final de pH es de 4.5 a 5.5. (Gavilánez., 2019).

Los mercados internacionales del cacao, especialmente la Unión Europea, exigen mayor calidad y aroma, característica relacionada con el origen de los granos, sin embargo, una etapa decisiva la constituye el proceso de beneficiado mediante la fermentación y el secado, lo cual permite obtener un producto de buena calidad. El beneficiado tiene como objetivo

primordial garantizar que la almendra de cacao adquiriera el sabor y aroma característico del chocolate, necesario para obtener un producto de calidad.

La visión artificial es un campo que se viene desarrollando en las últimas décadas y que tiene aplicaciones en distintos sectores de la industria, esto se da ya que en su mayoría la información recibida por el hombre es visual, adquirir dicha información en un sistema computacional se llama “Procesamiento y reconocimiento de imágenes por computadora”. (Ernest, 1979), investigadores vienen desarrollando aplicaciones en distintos campos como la agroindustria, la medicina, la minería, la seguridad. (Alcaraz & Enrico, 1995).

El desarrollo de algoritmos computacionales busca solucionar problemas como la detección, identificación y clasificación de objetos, entre otras necesidades (Rangel, 2000).

El color de los alimentos, y en general de materiales sólidos y semisólidos de diversa naturaleza, se representa tradicionalmente usando el espacio de color CIELAB (o CIE 1976 $L^*a^*b^*$), un estándar internacional para medición de color adoptado por la Commission Internationale d'Eclairage (CIE) en 1976.

El color es una característica de calidad de gran importancia, dado que es el primer aspecto que perciben los consumidores o usuarios, y puede determinar la aceptación o rechazo de un producto y su valor (León *et al.* 2006, Wu y Sun 2013). En esta representación de color, L^* representa la luminosidad de una muestra, a^* representa la variación de verde a rojo, y b^* representa la variación de azul a amarillo. (Goñi, 2015)

En la Región Nor Oriental los productores cacaoteros no le dan la debida importancia al proceso de fermentación, predominando así un método artesanal e empírico, sin tener en cuenta que esta es una etapa imprescindible para determinar el sabor y aroma; y sobre todo la calidad del cacao; no cuentan con los parámetros óptimos de una buena fermentación, existe una inadecuada selección del cacao porque no fermentan de acuerdo al tipo de variedad e índice de madurez.

Es por ello que en la investigación se determinó la calidad de cacao criollo (*Theobroma cacao L.*) fermentado mediante visión computacional ya que es una alternativa confiable para estimar el grado de fermentación, no manipulamos ni estamos en contacto directo con los granos de cacao, además este método proporciona información de forma rápida, segura y no destructiva de la composición fisicoquímica de los alimento.

II. OBJETIVOS

2.1. General

Determinar la calidad de cacao criollo fermentado mediante visión computacional.

2.2. Especifico

- a) Determinar los parámetros de fermentación óptimos de cacao. (Estado de madurez, frecuencia de remoción, días de fermentación)
- b) Realizar el análisis fisicoquímico del proceso de fermentación del cacao. (Acidez titulable y pH)
- c) Establecer una propuesta de trabajo para mejorar el proceso de fermentación mediante visión computacional.

III. MATERIAL Y MÉTODOS

Los frutos de cacao criollo (*Theobroma cacao L.*) que se utilizó en la investigación se cosecharon del banco de germoplasma de la Dirección Regional de Agricultura ubicado en el sector Yanuyacu del distrito de Jaén, provincia de Jaén, región Cajamarca. Se cosechó 150 mazorcas clasificadas en tamaño y color entre verde, pintón y maduros, utilizando una tijera de podar.



Fotografía 1. Cosecha y clasificación del cacao criollo.

Los frutos clasificados por color y madurez se trasladaron en tres sacos de polipropileno al laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Carrera Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Jaén. En las mesas de acero inoxidable del laboratorio se colocaron las mazorcas clasificando visualmente que esté libre de daños mecánicos o alguna contaminación; se procedió a lavar cada una de las mazorcas con agua corriente del caño con la finalidad de eliminar las impurezas, se secaron a medio ambiente y se procedió a pesar las mazorcas para determinar el rendimiento.



Fotografía 2. Clasificación de frutos verde, pintón y maduro de cacao criollo.

Se realizó el quebrado que consiste en cortar con la ayuda de un cuchillo en forma diagonal la mazorca, evitando cortar los granos, esto se realizó con la finalidad de extraer los granos introduciendo la mano y separando de la cascara, colocándose en recipientes de acero inoxidable, los granos como las cascara fueron pesados con la finalidad de determinar el rendimiento.



Fotografía 3. Cortado de la mazorca de cacao con la finalidad de extraer la semilla.

Extraído los granos se procedió a realizar el análisis fisicoquímico como pH, acidez titulable, análisis mediante visión computacional y se pesó 1 kg de cacao, luego se depositó en cajones de madera de 22 cm de largo, 12 cm de ancho y 9 cm de alto con capacidad de 1kg, los 15 cajones se encontraron rotulados de acuerdo al diseño estadístico Box –Behnken a emplear en la investigación; utilizando 15 kg de cacao criollo.



Fotografía 4. Acondicionamiento de los cajones de fermentación.

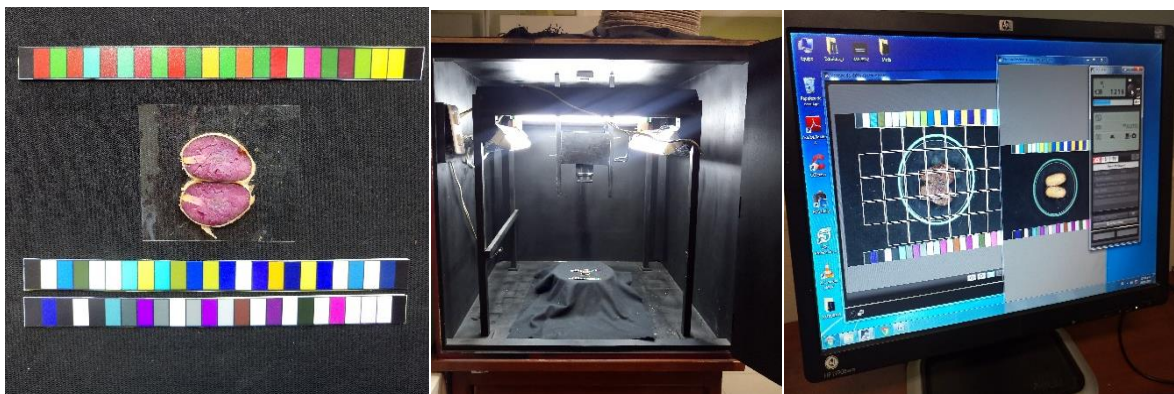
La temperatura fue medida desde el día que se colocó los granos de cacao en los cajones hasta el día siete cada 24 horas empleando un termómetro de mercurio; La remoción se realizó a partir del segundo día de iniciado la fermentación cada 12, 24 y 36 horas de acuerdo al diseño estadístico, se realizó con la ayuda de una baqueta de vidrio removiendo todos los granos dejando siempre que los granos de la parte superior se homogenicen con los granos ubicados en el fondo del cajón; de acuerdo al diseño estadístico se realizaron los análisis fisicoquímicos durante la fermentación.



Fotografía 5. Medida de temperatura y remoción de la fermentación del cacao.

Para el análisis de visión computacional se empleó un cajón de madera de 1m x1m x 1m. pintado de color negro la parte interior en la cual se realizó la instalación de dos fluorescentes para la iluminación y se colocó una cámara digital (celular: SONY EXPERIA ULTRA 21MP) con acceso a PC (computador portátil) para tomas fotográficas de las muestras, en la base interior del cajón se colocaron unas cartas de color para referenciar el color de las muestras.

Las muestras de cacao tanto frescas como fermentadas fueron colocadas en una placa petri enteras y cortadas por la mitad con un bisturí y se procedió a tomar las fotos codificadas de acuerdo al diseño estadístico para luego ser analizadas; las fotos fueron seleccionadas mediante la aplicación Paint, construido el algoritmo de análisis de color en el software MATLAB, se procedió a analizar las muestras obteniendo los datos de las coordenadas L^* a^* b^* dónde el L^* representa la luminosidad de una muestra, a^* representa la variación de verde a rojo, y b^* representa la variación de azul a amarillo.



Fotografía 6. Toma de imagen mediante visión computacional.

Concluida la fermentación de los 15 cajones según el diseño estadístico se procedió a secar a temperatura ambiente durante 5 días las muestras por 5 horas removiendo cada cierto tiempo, luego se colocó en la estufa hasta obtener 7 % de humedad, luego se almaceno en bolsas de polietileno para los análisis correspondientes.



Fotografía 7. Secado de las muestras de cacao a temperatura ambiente y almacenado.

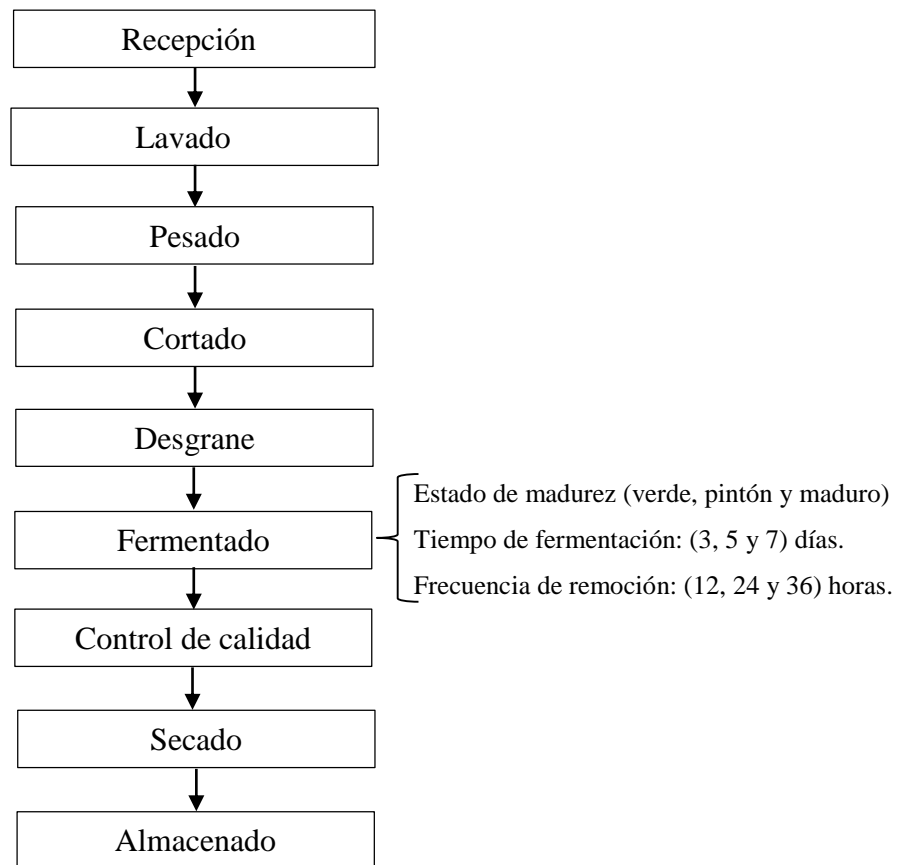


Figura 1. Diagrama de flujo para obtener granos de cacao fermentado

3.1. Análisis fisicoquímico de los granos de cacao

3.1.1. Determinación de la acidez total

Se realizó utilizando el equipo de titulación para la cual se pesó 10 gr de cacao, se trituró con ayuda de un mortero, luego se mezcló con agua destilada obteniendo 250 ml de solución filtrada mediante papel filtro; se transfirió 50 ml de la solución a un matraz erlenmeyer de 125 ml, se agregó 1 ml de fenolftaleína y se tituló con hidróxido de sodio, registrándose así el gasto, y se calculó la acidez mediante la fórmula. (Ácido presente acético, 0.060).

$$\% \text{ Acidez} = \frac{(\text{mL NaOH})(N)(\text{meq de ácido})(\text{Vol. de dilución})}{(\text{g o mL de muestra})(\text{mL alícuota})} \times 100$$



Fotografía 8. Determinación de la acidez de granos de cacao fermentados.

3.1.2. Determinación del pH

En un mortero se trituro los granos de cacao y se tomó 10 g de muestra se mezcló con agua destilada hasta obtener 250 ml de solución, homogenizado la muestra con una bagueta se introdujo el potenciómetro previamente calibrada midiendo el pH el cual fue reportado.



Fotografía 9. Determinación del pH de granos de cacao fermentados.

3.1.3. Determinación de humedad

La humedad se determinó mediante el método de secado en la estufa; se tomó 3 granos de cacao de cada tratamiento de acuerdo a los días de fermentación y según el diseño estadístico, con ayuda de una balanza analítica se pesó en una placa petri las muestras reportando así el peso inicial de cada una, luego se llevó a la estufa para su secado esta se programó por 5 horas a 60 °C, luego se retiró la muestra de la estufa, se dejó enfriar en el desecador por 15 min y se procedía a reportar su peso.

Esto se repetía hasta que el peso final fuera constante. Se calculó el porcentaje de humedad aplicando la siguiente fórmula.

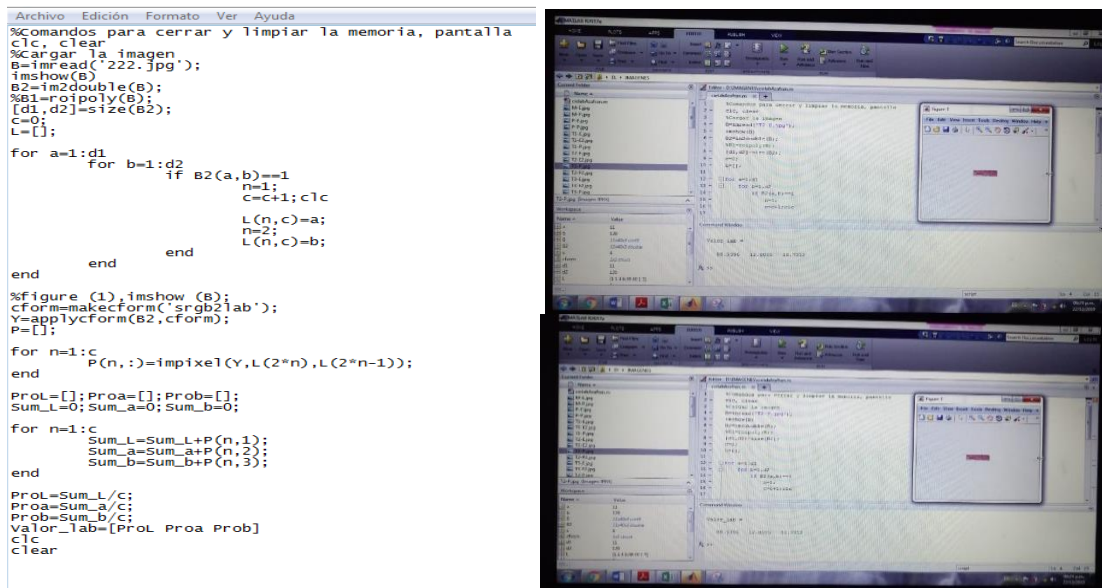
$$\%H = \frac{\text{Peso de la muestra húmeda} - \text{peso de la muestra seca}}{\text{peso de la muestra húmeda}} \times 100$$



Fotografía 10. Determinación de la humedad de granos de cacao fermentados.

3.2. Análisis mediante visión computacional

Se utilizó el modelo de color CIELAB o *L*a*b que determina el color de acuerdo a la posición en el espacio en tres dimensiones (3D). Las variables estudiadas se muestra en la Tabla 1; el proceso de fermentación se realizó mediante el diseño estadístico de Box –Behnken (Tabla 2).



Fotografía 11. Algoritmo y análisis de imagen en el Matlab.

Los granos de cacao criollo seleccionados según el estado de madurez fisiológica se les designó un número, se depositaron en cajones de madera y se evaluó frecuencia de remoción y tiempo de fermentación (tabla1).

Tabla 1*Valor de las variables a evaluar con el diseño estadístico de Box – Behnken.*

Concentración		*Estado de madurez	Frecuencia de remoción (Hora)	Tiempo (Días)
		A	B	C
Alta	(+)	15	36	7
Media	(0)	10	24	5
Baja	(-)	5	12	3

*(Maduro = 15, Pintón = 10, Verde = 5)

Se emplearon 15 cajones de madera con capacidad de 1kg, con las mismas características y medidas geométrica, donde se realizó la fermentación, según diseño estadístico de Box – Behnken (tabla 2).

Tabla 2*Diseño estadístico de Box – Behnken para evaluar las tres variables independientes*

Número Experimento	Variables		
	A	B	C
1	-	-	0
2	-	+	0
3	+	-	0
4	+	+	0
5	-	0	-
6	-	0	+
7	+	0	-
8	+	0	+
9	0	-	-
10	0	-	+
11	0	+	-
12	0	+	+
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0

Fuente (Montgomery, 2004)

3.2.1. Diseño estadístico

El nivel óptimo de cada variable independiente fue determinado usando las técnicas de Optimización de Respuesta Superficial (Daniel, 1976), el cual fue aplicado a las 3 variables independientes y sus relaciones se ajustaron al siguiente modelo polinomial cuadrático.

$$Z = b_0 + b_1A + b_2B + b_3C + b_4AB + b_5AC + b_6BC + b_7A^2 + b_8B^2 + b_9C^2$$

Donde:

Z = Variable dependiente (pH)

A, B, C = Variables independientes

b₀ = Coeficiente de regresión en el punto central

b₁, b₂, b₃ = Coeficientes lineales

b₄, b₅, b₆ = Coeficientes de interacción de segundo orden

b₇, b₈, b₉ = Coeficientes cuadráticos

Para la identificación de un valor óptimo fue necesario estimar la curvatura, para lo cual cada variable fue ensayada en 15 niveles mediante el diseño de Box-Behnken que es un diseño factorial fraccional. (Daniel, 1976)

Los coeficientes del modelo polinomial fueron calculados usando las técnicas de regresión múltiple y luego se escribió las ecuaciones XY polinomiales, las que fueron usadas para generar respuestas y líneas de contorno para las diferentes combinaciones de los niveles de las variables. Todos los cálculos y gráficos estadísticos fueron realizados con el software Statgraphics Centurion XVI.I.

IV. RESULTADOS

Los resultados del análisis fisicoquímico y de visión computacional del cacao criollo fresco se muestran en la tabla 3.

Tabla 3
Análisis fisicoquímico del cacao criollo fresco

Estado de madurez	pH	Acidez	Humedad (%)	Coordenadas VC Grano Entero			Coordenadas VC Grano Partido		
				L*	a*	b*	Lx*	ax*	bx*
Maduro	6.63	0.18	76.75	98.03	-0.67	11.20	85.37	16.03	27.96
Pintón	6.71	0.19	98.62	95.03	1.24	20.79	84.37	17.15	28.81
Verde	6.22	0.23	76.75	97.11	-0.58	15.67	86.82	14.38	22.34

Las variables estudiadas en la investigación según el diseño estadístico de Box-Behnken se muestran en la tabla 4.

Tabla 4*Diseño estadístico de Box – Behnken para evaluar las tres variables independientes y VC*

Numero Experimento	Variables			pH	Acidez	Coordenadas VC			Coordenadas VC		
						Grano Entero			Grano Partido		
	A	B	C			L*	a*	b*	Lx*	ax*	bx*
1	5	12	5	6.08	1.02	83.65	16.99	36.89	88.15	12.95	18.61
2	5	36	5	5.76	1.22	74.84	30.33	65.43	88.94	12.01	18.73
3	15	12	5	5.46	2.10	86.55	8.68	55.23	81.60	24.97	16.66
4	15	36	5	6.58	0.36	75.53	75.53	53.77	85.84	16.22	21.40
5	5	24	3	5.15	1.79	90.62	5.81	31.78	87.01	19.17	3.60
6	5	24	7	7.38	0.18	86.97	15.29	17.21	82.12	17.70	48.71
7	15	24	3	6.17	0.33	79.85	19.63	70.65	84.05	17.74	29.27
8	15	24	7	6.43	0.59	87.59	10.77	32.05	80.02	2.15	46.31
9	10	12	3	5.22	0.80	88.90	7.52	38.15	84.16	25.92	2.97
10	10	12	7	5.93	1.14	80.36	23.73	34.77	80.00	29.17	11.80
11	10	36	3	5.3	0.83	89.95	6.37	34.22	87.62	19.02	0.14
12	10	36	7	6.13	1.02	80.94	21.73	38.87	82.64	21.60	23.40
13	10	24	5	5.65	1.44	78.06	24.88	54.08	87.14	10.36	38.55
14	10	24	5	5.65	1.44	78.06	24.88	54.08	87.14	10.36	38.55
15	10	24	5	5.65	1.44	78.06	24.88	54.08	87.14	10.36	38.55

❖ (*L= luminosidad; *a = variación de verde a rojo ; *b = variación Azul a amarillo)

Los datos de la Tabla 4 fueron procesados en el software Statgraphics Centurion XVI.I ; Para obtener los coeficientes de regresión tabla 5, efecto estimado de pH tabla 6, análisis de varianza de pH mostrados en la tabla 7.

Tabla 5

Coeficiente de regresión obtenida con el software Statgraphics Centurion XVI.I.; a partir de los datos de la tabla 4.

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
Constante	5.42156
A:Estado de madurez	-0.274
B:Frecuencia de remoción	-0.00208333
C:Tiempo de fermentación	0.33
AA	0.01915
AB	0.006
AC	-0.04925
BB	-0.00110243
BC	0.00125
CC	0.0384375

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\text{pH} = 5.42156 - 0.274 \cdot \text{Estado de madurez} - 0.00208333 \cdot \text{Frecuencia de remoción} + 0.33 \cdot \text{Tiempo de fermentación} + 0.01915 \cdot \text{Estado de madurez}^2 + 0.006 \cdot \text{Estado de madurez} \cdot \text{Frecuencia de remoción} - 0.04925 \cdot \text{Estado de madurez} \cdot \text{Tiempo de fermentación} - 0.00110243 \cdot \text{Frecuencia de remoción}^2 + 0.00125 \cdot \text{Frecuencia de remoción} \cdot \text{Tiempo de fermentación} + 0.0384375 \cdot \text{Tiempo de fermentación}^2$$
 (reportado por Statgraphics Centurion XVI.I.)

Tabla 6

Efectos estimados de pH, obtenidos con software Statgraphics Centurion XVI.I.; a partir de los datos de la tabla 4..

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
Promedio	5.65	0.0995741	
A:Estado de madurez	0.0675	0.121953	1.0
B:Frecuencia de remoción	0.27	0.121953	1.0
C:Tiempo de fermentación	1.0075	0.121953	1.0
AA	0.9575	0.17951	1.01111
AB	0.72	0.172467	1.0
AC	-0.985	0.172467	1.0
BB	-0.3175	0.17951	1.01111
BC	0.06	0.172467	1.0
CC	0.3075	0.17951	1.01111

La tabla 6 muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones, también se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1.01111. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Tabla 7

Análisis de Varianza para pH obtenidos con Statgraphics Centurion XVI.I.; a partir de los datos de la tabla 4.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Estado de madurez	0.0091125	1	0.0091125	0.31	0.6038
B:Frecuencia de remoción	0.1458	1	0.1458	4.90	0.0777
C:Tiempo de fermentación	2.03011	1	2.03011	68.25	0.0004
AA	0.846283	1	0.846283	28.45	0.0031
AB	0.5184	1	0.5184	17.43	0.0087
AC	0.970225	1	0.970225	32.62	0.0023
BB	0.0930519	1	0.0930519	3.13	0.1372
BC	0.0036	1	0.0036	0.12	0.7421
CC	0.0872827	1	0.0872827	2.93	0.1474
Error total	0.148725	5	0.029745		
Total (corr.)	4.87829	14			

Según el reporte de Statgraphics Centurion XVI.I; tenemos los siguientes resultados:

R-cuadrada = 96.9513 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 91.4636 por ciento

Error estándar del est. = 0.172467

Error absoluto medio = 0.0806667

Estadístico Durbin-Watson = 1.38589 (P=0.0442)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0.284859

La tabla ANOVA particiona la variabilidad de pH en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error estadístico.

En este caso, 4 efectos tienen una valor-P menor que 0.05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95.0%.

Respuesta Optimizada

❖ **Meta: Maximizar pH**

Valor óptimo = 7.30484

Tabla 8

Valores óptimos de las variables independientes

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Estado de madurez	5.0	15.0	5.0
Frecuencia de remoción	12.0	36.0	16.6506
Tiempo de fermentación	3.0	7.0	6.99994

En la tabla 8 se muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza pH sobre la región indicada.

Respuesta Optimizada

❖ **Meta: Minimizar pH**

Valor óptimo = 4.83626

Tabla 9

Valores óptimos de las variables independientes

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Estado de madurez	5.0	15.0	5.28157
Frecuencia de remoción	12.0	36.0	36.0
Tiempo de fermentación	3.0	7.0	3.0

En la tabla 9 se muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual minimiza pH sobre la región indicada.

Respuesta Optimizada

❖ **Meta: Mantener pH en 5.2**

Valor óptimo = 5.2

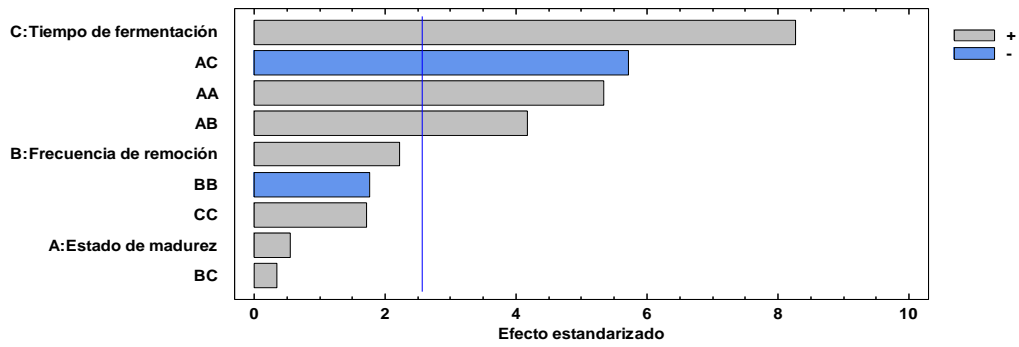
Tabla 10

Valores óptimos de las variables independientes

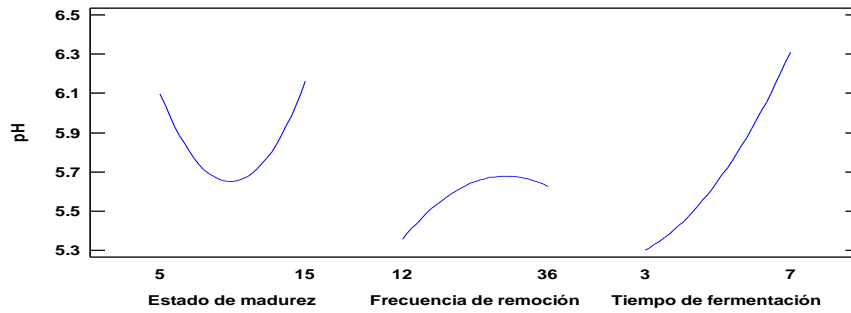
<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
Estado de madurez	5.0	15.0	8.8609
Frecuencia de remoción	12.0	36.0	29.528
Tiempo de fermentación	3.0	7.0	3.10973

En la tabla 10 se muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual mantiene pH en 5.2 sobre la región indicada.

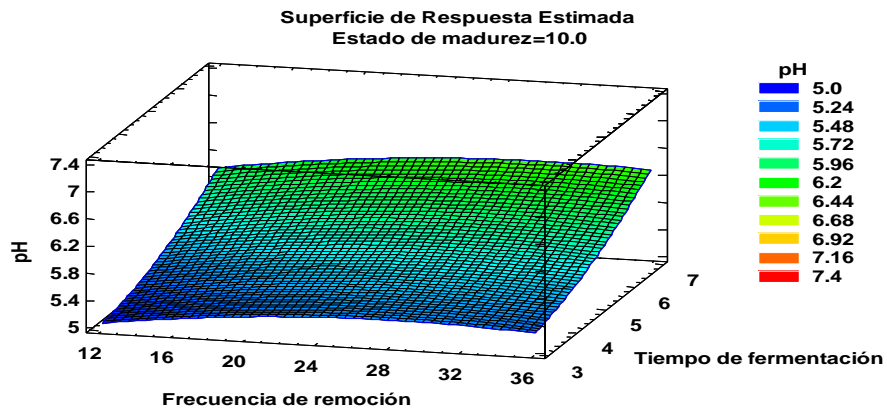
A continuación se presenta las gráficas obtenidas del procesamiento de los datos de la tabla 4 con el software Statgraphics Centurion XVI.I. Obsérvese que en el diagrama de Pareto el efecto del tiempo tiene una alta influencia en la variable respuesta (pH); también se observa que el efecto de BC (frecuencia de remoción – tiempo) tiene una baja influencia en el pH.



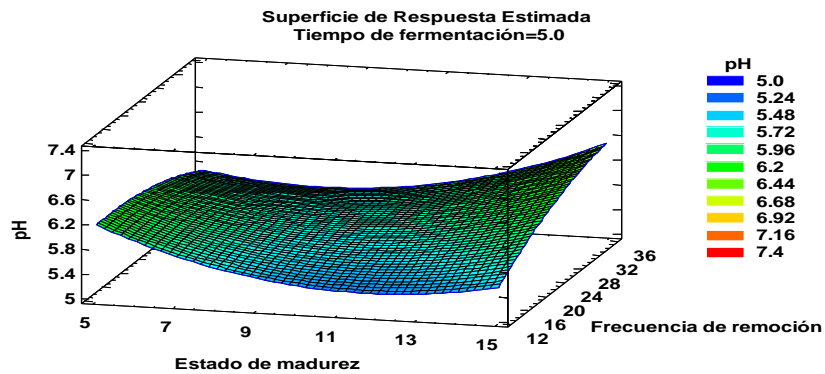
Gráfica 1. Diagrama de Pareto estandarizada para pH.



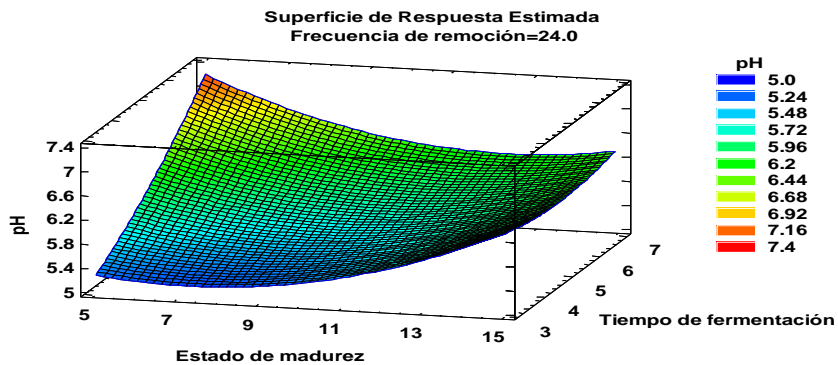
Gráfica 2. Efectos principales para pH.



Gráfica 3. Superficie de respuesta estimada en función del estado de madurez.



Gráfica 4. Superficie de respuesta estimada en función del tiempo de fermentación.



Gráfica 5. Superficie de respuesta estimada en función de la frecuencia de remoción.

Usando el software Weka, que está constituido por una serie de paquetes de código abierto con diferentes técnicas de preprocesado, clasificación y predicción, agrupamiento, regresión, asociación, y visualización, se procesó los datos del *Diseño estadístico de Box – Behnken* tabla 4, ver Figura 2.

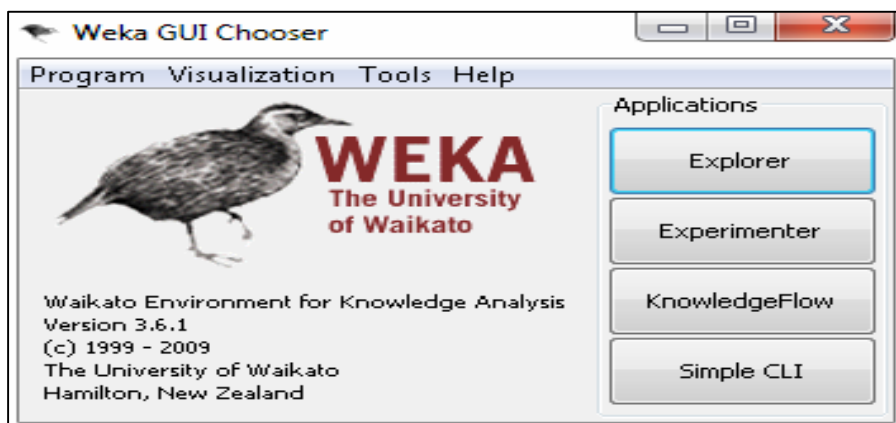


Figura 2. Ventana de inicio del software Weka

Los datos de entrada a la herramienta, sobre los que operaron las técnicas implementadas, estuvieron codificados en formato arff, que es un tipo de documento en formato abierto que acepta el software. En la Figura 3, se observa cuando estos datos han sido incluidos.

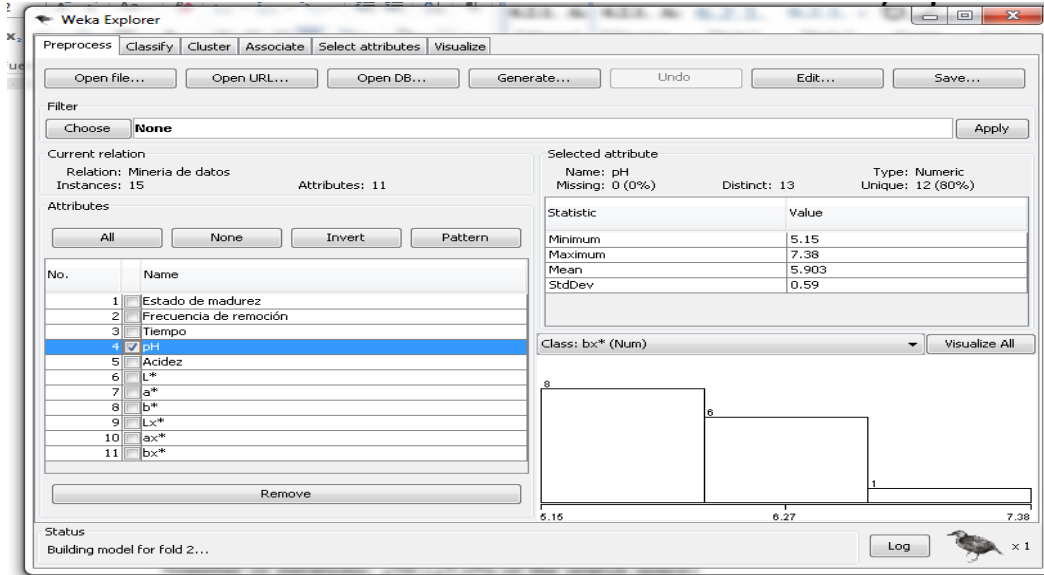


Figura 3. Archivo arff con los once atributos cargados en Weka

Se utilizó las once variables descritas en forma vertical de la Tabla 4, y para construir el modelo empleamos el algoritmo ClassifierSubsetEval -B weka, se trabajó en función del pH ya que este es un indicador relevante durante la fermentación ver Figura 4.

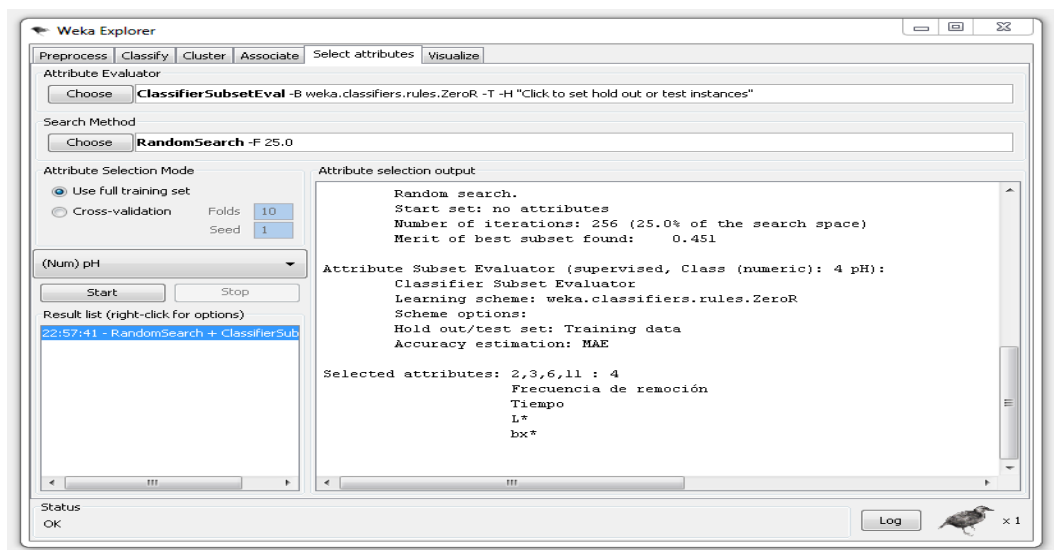


Figura 4. Selección de atributos que influyen en el pH

==== Run information ====

Evaluator: weka.attributeSelection.ClassifierSubsetEval -B weka.classifiers.rules.ZeroR -T -H "Click to set hold out or test instances"

Search: weka.attributeSelection.RandomSearch -F 25.0

Relation: Minería de datos

Instances: 15

Attributes: 11

Estado de madurez

Frecuencia de remoción

Tiempo

pH

Acidez

L*

a*

b*

Lx*

ax*

bx*

Evaluation mode: evaluate on all training data

==== Attribute Selection on all input data ====

Search Method:

Random search.

Start set: no attributes

Number of iterations: 256 (25.0% of the search space)

Merit of best subset found: 0.451

Attribute Subset Evaluator (supervised, Class (numeric): 4 pH):

Classifier Subset Evaluator

Learning scheme: weka.classifiers.rules.ZeroR

Scheme options:

Hold out/test set: Training data

Accuracy estimation: MAE

Selected attributes: 2,3,6,11 : 4

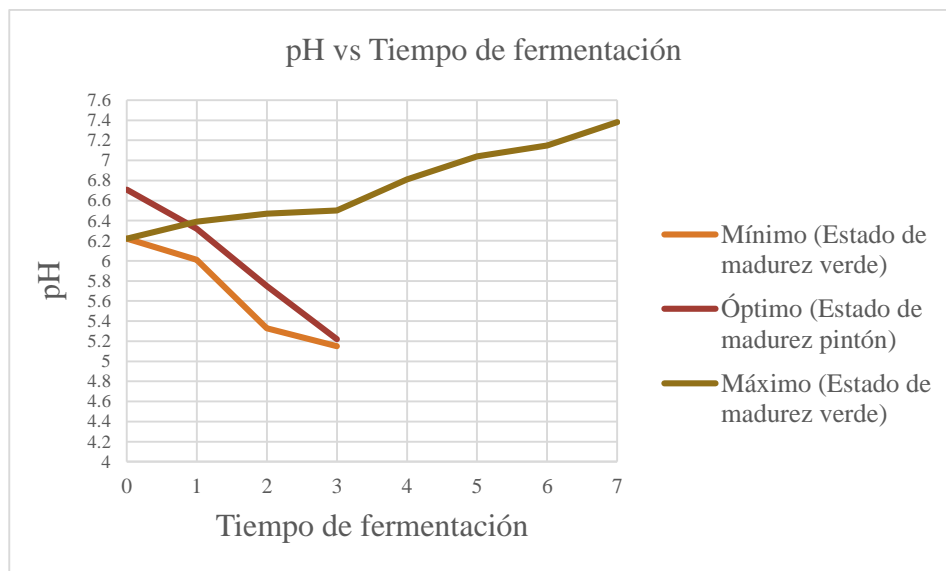
Frecuencia de remoción

Tiempo

L*

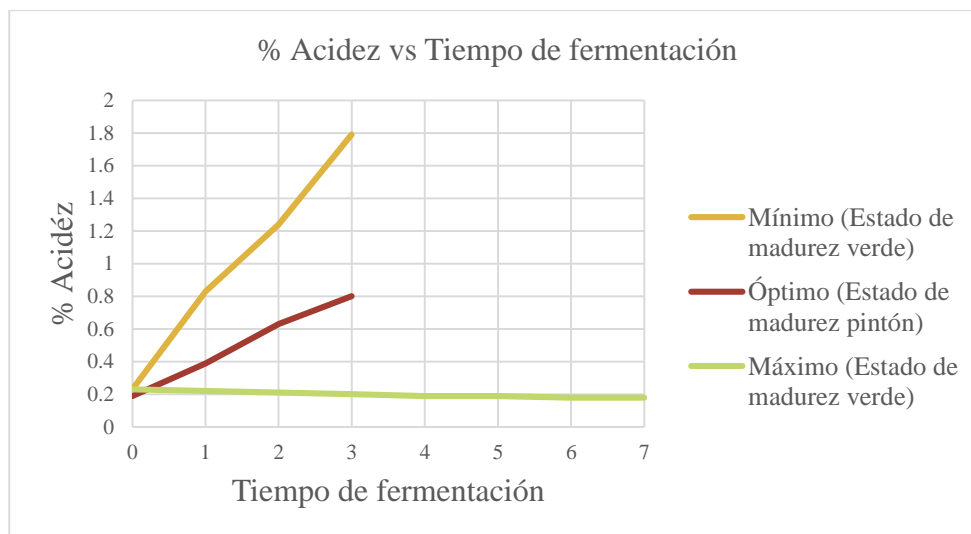
bx*

Con los datos de la tabla 3 y 4 se construyó la gráfica 6, donde se aprecia que el pH óptimo (madurez pintón) a los tres días culmina la fermentación con un pH de 5.2; y el pH mínimo (madurez verde) culmina la fermentación igual a los tres días con pH de 5.1 siendo la diferencia entre los dos no muy significativa, a diferencia del pH máximo (madurez verde) culmina el tiempo de fermentación a los siete días con un pH de 7.38. (Tabla 12)



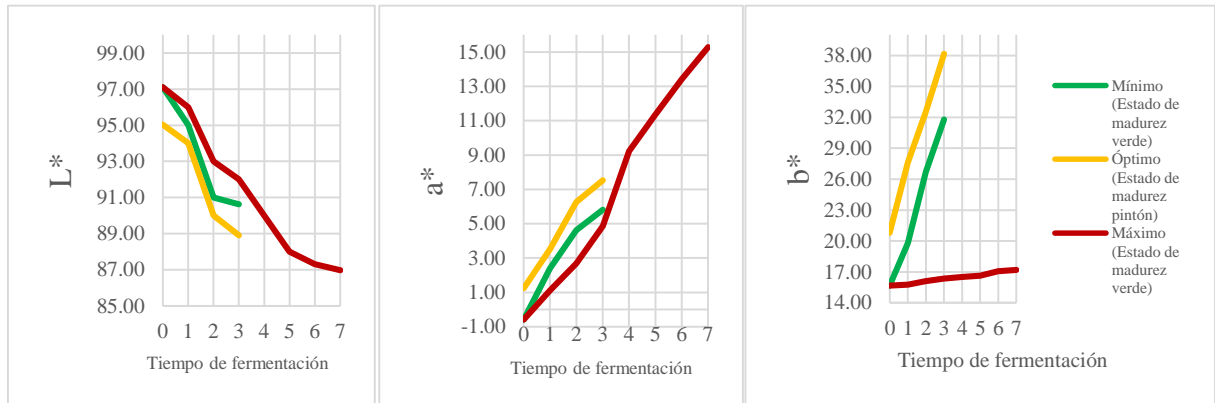
Gráfica 6. pH vs Tiempo de fermentación

Con los datos de la tabla 3 y 4, se construyó la gráfica 7, donde se aprecia que el % de acidez óptimo (madurez pintón) es 0.8 a los tres días de culminada la fermentación mientras que el % de acidez mínimo (madurez verde) es 1.8 a los tres días de culminada la fermentación y el % de acidez máximo (madurez verde) es 0.18 culminada a los siete de la fermentación existiendo diferencia significativa. (Tabla 13)



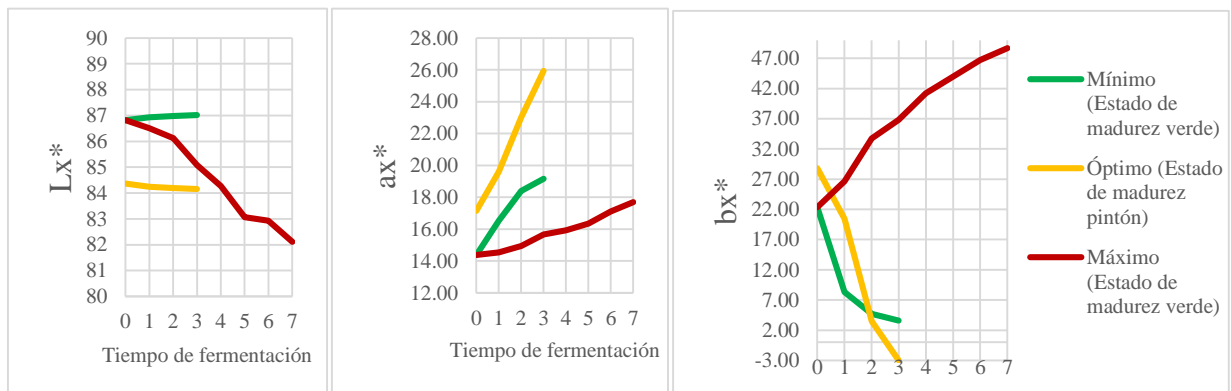
Gráfica 7. % Acidez vs Tiempo de fermentación

Con los datos de la tabla 4, se construyó la gráfica 8, variación de color $L^*a^*b^*$ (grano entero) vs tiempo de fermentación donde se aprecia que el L^* óptimo es 88.9 el cual desciende al tercer día al igual que el L^* mínimo que es 90.6 y el L^* máximo 86.9 quien desciende a los siete días de culminada la fermentación; a diferencia del a^* óptimo como el mínimo ascienden al tercer día siendo para el primero 7.52 y el segundo 5.81 y el a^* máximo alcanzo 15.29 a los siete días de culminada la fermentación ; para el b^* óptimo es 38.15 y el mínimo 31.78 al tercer día, para el b^* máximo descendió a 17.21 culminando a los siete días la fermentación. (Tabla 14, 15 y 16)



Gráfica 8. $L^*a^*b^*$ vs tiempo de fermentación

A continuación se muestran la gráfica 9, variación de color $Lx^*ax^*bx^*$ (grano partido) vs tiempo de fermentación se construyó con los datos de la tabla 4, donde el L^* óptimo es 84.16 el L^* mínimo 87.01 a los tres días de culminada la fermentación siendo casi constante en ambos, a diferencia del L^* máximo 82.12 quien descendió culminados los siete días de fermentación; ax^* óptimo es 25.92 y ax^* mínimo 19.1 culminado a los tres días de fermentación y ax^* máximo 17.70 a los siete días de culminada la fermentación; a diferencia del bx^* óptimo 2.97 y el bx^* mínimo 3.60 culminada a los tres días la fermentación y el bx^* máximo es 48.71 culminada la fermentación a los siete días . (Tabla 17,18 y 19)



Gráficas 9. $Lx^*ax^*bx^*$ vs tiempo de fermentación

V. DISCUSIÓN

- Según los resultados obtenidos del programa del software Statgraphics *Centurion XVI.I.* optimizaron que el valor óptimo de pH =5.2; teniendo así el estado de madurez óptimo = 8.8609 (pintón); frecuencia de remoción óptima = 29.528 horas; tiempo de fermentación óptimo= 3.10973 días y mediante visión computacional de acuerdo al software Weka selecciono por atributos que las variables que influyen en el pH es la frecuencia de remoción, tiempo de fermentación, L*(grano entero), bx*(grano partido) es por ello que de acuerdo a estos resultados y seleccionando en el *Diseño estadístico de Box – Behnken* determinamos que el mejor tratamiento es el nueve. Según Afoakawa, et al. (2008), el cacao fermentado con un pH entre 5,5-5,8 es considerado como pobremente fermentado, mientras que un cacao con un pH entre 4,7-5,2 se considera que ha sido fermentado adecuadamente. Dicho esto y comparando con los resultados de la investigación, se puede decir que el tratamiento nueve tuvo una fermentación adecuada, pero aun así también se puede trabajar con el tratamiento cinco porque el pH se encuentra dentro del rango.
- Según los resultados obtenidos de acuerdo a la variación del color analizado mediante visión computacional para el grano entero el L* óptimo = 88.9, a*óptimo = 7.52, b*óptimo = 38.15; y la variación del color para el grano partido presenta que el Lx*óptimo = 84.16, ax*óptimo = 25.92, bx*óptimo = 2.97. Mediante estos resultados se estima que el L* óptimo y el Lx*óptimo existe una variación mínima de 4.74 a diferencia del a*óptimo quien tiene un numero bajo de 7.52 con respecto al y ax* óptimo quien tiene 25.92 . En el b*óptimo y bx*óptimo la diferencia es aún más significativa bx* respecto al b* existe un 35.18 de diferencia entre los dos . Los resultados obtenidos son semejantes a los reportados por Afoakawa *et al.* (2012), quienes mencionan que el descenso del valor de a* se debe a la hidrólisis de las antocianinas que imparten el color purpura de las almendras de cacao. El descenso de la luminosidad (L*) se debe al oscurecimiento de los granos. Este fenómeno es producido por la hidrólisis de las antocianinas y la posterior oxidación de agliconas a compuestos quinónicos, los cuales contribuyen a la formación de compuestos pardos característicos del cacao fermentado

(Cros *et al.*, citado por Ortiz *et al.* 2009). Estas diferencias se pueden atribuir que van a depender del tipo de fermentación empleada y la procedencia del cacao.

- Según la gráfica 6 el pH de los granos de cacao tanto para el mínimo (estado de madurez verde) como para el óptimo (estado de madurez pintón) disminuyó culminada la fermentación de 6.62 a un pH = 5.1 y de 6.71 a un pH = 5.2. Según García (2000), menciona que inicialmente los cotiledones de cacao poseen un pH casi neutro, el cual disminuye debido a la difusión de los ácidos formados en la fermentación de la pulpa externa. El autor mencionó que la disminución del pH está asociada a la formación de ácido acético, cuya concentración aproximada es de 1,90 g ác. Acético/100g, el cual representa el 95-98 por ciento de los ácidos volátiles. Además según García (2018) un cacao con un pH entre 4,7 - 5,2 se considera que ha sido fermentado adecuadamente.

- Según la gráfica 7 se obtuvo que el % de acidez mínimo = 1.79 y el % de acidez óptima es = 0.80 existiendo diferencia una de otra; García et al. (2002) mencionan que la concentración de ácido acético disminuye gradualmente debido a la volatilización del ácido acético, inducido por las remociones o aireación y a las altas temperaturas.

VI. CONCLUSIONES

- Se determinó la calidad de cacao criollo fermentado mediante el diseño estadístico de Box-Behnken y visión computacional teniendo resultados satisfactorios en la evaluación como mejor tratamiento el nueve, se analizaron las variables independientes que influyen en determinadas características de la fermentación teniendo como resultados: Estado de madurez pintón, frecuencia de remoción cada 12 horas y tiempo de fermentación tres días. Coordenadas VC para grano entero $L^* = 88.9$, $a^* = 7.52$, $b^* = 38.15$ y para grano partido $Lx^* = 84.16$, $ax^* = 25.92$, $bx^* = 2.97$.
- Los valores óptimos de las variables independientes son :
Según el estado de madurez óptimo al cacao debe ser pintón; con una frecuencia de remoción óptima de 30 horas; y tiempo de fermentación óptimo tres días; y con respecto a los atributos que tienen mayor influencia en el proceso de fermentación tenemos al pH, frecuencia de remoción, tiempo de fermentación, y de acuerdo a la variación de color ($L^*a^*b^*$) se considera al L^* para el grano entero, y el bx^* para el grano partido como las coordenadas a considerar de visión computacional.
- De acuerdo a los análisis fisicoquímicos del proceso de fermentación el mejor tratamiento es el nueve con un pH de 5.2 y con un % acidez de 0.80 pudiéndose considerar también al cinco ya que esta dentro del rango de pH considerado como buen fermentado.
- La propuesta de trabajo es implementar un sistema de control de calidad de la fermentación del cacao criollo empleando visión computacional que consiste en captar la imagen de los granos de cacao con una cámara fotográfica, tomar la imagen procesar en el software Matlab y validar las coordenadas de color de acuerdo al patrón deseado, desarrollar un algoritmo que permita el reporte de imagen y procesamiento desde el celular.

VI. RECOMENDACIONES

- Las investigaciones que pretenden solucionar problemas de las organizaciones, sean realizadas en campo en el lugar de los hechos, ya que si comparamos los análisis de laboratorios con el campo el ambiente es diferente para el caso de fermentación de cacao.
- Validar los procesos a fin de que los productores tengan un sistema de seguimiento adecuado de la calidad.
- Realizar e impulsar trabajos de investigación que solucionen los problemas de los productores y sean sostenibles en el tiempo y ayuden a mejorar su calidad de vida.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afoakawa, E; Paterson A; Fowler M. 2008. Flavor formation and character in cocoa and chocolate. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (45):1-18.
- Afoakawa, E; Simpson, A; Takrama, J; Firibu, K. 2012. Influence of pulppreconditioning and fermentation on fermentative quality and appearance of Ghanaian cocoa. *International Food Research Journal* 19(1):127-133
- García, P. 2000. Caracterización microbiana, bioquímica y cinética del proceso de fermentación tradicional durante el beneficio de cacao. Tesis Ing. México DF, México. Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa.
- García, P; Urrieta, J; Morales, R; García, M. 2002. Perfiles de concentración interna de acidez y temperatura a través de la fermentación de cacao. Memorias in extensor del III Encuentro Internacional de Biotecnología UPIBI2002. Querétaro, Qro 107-116.
- García, J. C. (2018). “*Correlación de la porosidad con el grado de fermentación del grano de cacao peruano (Theobroma cacao L.)*”. Lima-Perú. Obtenido de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3843/rivera-garcia-johan-cristian.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gaviláñez., C. Y. (2019). “*Diseño de un fermentador y secador solar piloto, para dos variedades de cacao (Theobroma cacao L), en el cantón el empalme provincia guayas*”. facultad de ciencias naturales y ambientales, Quito. Obtenido de <http://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3361/6/FERMENTACION%20DE%20CACAO.pdf>
- Goñi, S. M. (2015). Medición de color de alimentos en el espacio ciela a partir de. *3ras jornadas ITE - 2015 -Facultad de Ingeniería - UNLP*, 47-48. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/47868/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Ortiz L. de Bertorelli, Gervaise Rovedas L. y Lucía Graziani de Fariñas. (2009). Influencia de Varios Factores sobre Índice Físico del Grano de Cacao en Fermentación. *Agronomía Trop.* 59(1):8188. Obtenido de: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2009000100008.

- Gutiérrez, M. (2012). Efecto de la frecuencia de remoción y tiempo de fermentación en cajón cuadrado sobre la temperatura y el índice de fermentación del cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Científica UDO Agrícola* 12 (4): 914-918. 2012. Obtenido de: <http://www.bioline.org.br/pdf?cg12104>.
- Utami R., Hatmi, Mahargono Kobarsih and Nurdeana Cahyaningrum. (2015). Fungi Level Analysis of Cocoa Beans Based on Fermentation Box Type and Duration. *International Symposium on Food and Agro-biodiversity (ISFA2014)*, *Procedia Food Science* 3:371 – 382. Obtenido de: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211601X15000425.
- Álvarez C., Lumidla Tovar, Héctor García, Franklin Morillo, Pedro Sánchez, Cirilo Girón y Aldonis de Farias. (2010). Evaluación de la calidad comercial del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) usando dos tipos de fermentadores. *Revista Científica UDO Agrícola* 10(1):76-87. Obtenido de: <http://www.bioline.org.br/pdf?cg10010>.
- Fedecacao, F. N. D. C. (2004). El beneficio y características físico químicas del cacao (*Theobroma cacao* L.). Retrieved from. <http://www.fedecacao.com.co/site/index.php/1pub-publicaciones>.
- Bortolini C., Vania Patrone, Edoardo Puglisi, Lorenzo Morelli. (2016). Detailed analyses of the bacterial populations in processed cocoa beans of different geographic origin, subject to varied fermentation conditions. *Food Microbiology* 236: 98-106. ScienceDirect. Obtenido de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168160516303506>.
- Illegghems K., Rudy Pelicaen, Luc De Vuyst, Stefan Weckx. (2016) Assessment of the contribution of cocoa-derived strains of *Acetobacter ghanensis* and *Acetobacter senegalensis* to the cocoa bean fermentation process through a genomic approach. *Food Microbiology* 58: 6878. ScienceDirect. Obtenido de: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S074000201530006X>.
- Abdul O. Samah, N. Ibrahim, H. Alimon & M.I. Abdul Karim. (1993). Fermentation studies of stored cocoa beans. *World Journal of Microbiology and Biotechnology* 9: 603-604. Obtenido de: www.researchgate.net/publication/259721254_Fermentation_studies_of_stored_cocoa_beans.
- Alcaraz Gilberto Enrico, (1995) "Realce de imágenes utilizando técnicas de Mascaras", Capítulo 3, Tesis de Maestría, pág. 31-36. CITEDI - IPN, Mexico,

- Portillo, E., Farinas, L. G. De, & Betancourt, E. (2005). Efecto de los Tratamientos post-cosecha sobre la Temperatura y el Índice de Fermentación en la calidad del cacao criollo Porcelana (*Theobroma cacao* L.) en el Sur del Lago de Maracaibo. *Revista Facultad de Agronomía*, 388399. Obtenido de: http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-78182005000400007
- Agell, O. (2013). *La seguridad alimentaria del chocolate*. España: Observatori de Seguretat Alimentària.
- Ernest H. (1979), "Computer Image Processing", Academic Press, N. Y., Vázquez Alcaraz Gilberto Enrico, (1995) "Realce de imágenes utilizando técnicas de Mascaras", Capítulo 3, Tesis de Maestría, pág. 31-36. CITEDI - IPN, Mexico,
- R. S. Rangel. (2000) "Nueva metodología para el conteo de objetos en imágenes", Tesis de maestría, CIC- IPN, México.
- Goñi, S. M. (2015). Medición de Color de Alimentos en el Espacio Cielab a partir de. *3ras Jornadas ITE - 2015 -Facultad de Ingeniería - UNLP*, 47-48. Obtenido de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/47868/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Geographic, N. (02 de enero de 2020). El cacao blanco es la joya de Piura según lo destaca la famosa publicación National Geographic. *El Regional Piura*, pág. 1. Obtenido de <https://www.elregionalpiura.com.pe/index.php/regionales/150-piura/39191-el-cacao-blanco-es-la-joya-de-piura-segun-lo-destaca-la-famosa-publicacion-national-geographic>
- Nogales, J., Graziani DE Fariñas, L., Ortiz de Bertorelli, L. 2006. Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao 73 fermentados en dos diseños de cajones de madera. *Agronomía Trop.* 56(1): 5- 20p.
- Kalvatchev, Zlatko; Garzaro, Domingo; Guerra C, Franklin. , *Theobroma Cacao* L.: Un nuevo enfoque para nutrición y salud Agroalimentaria. 1998.
- BRAUDEAU J. 1970. *El cacao*. Primera edición. Editorial brume. Barcelona, España. 292 p.
- Amores F., PalacioS A., Jimenez J., Zhang D. 2009. Entorno ambiental, genética, atributos de calidad y singularización del cacao en el nor oriente de la provincia de esmeralda .Instituto nacional autónomo de investigación agropecuarios- ecuador 119p.
- Ortiz, L; Rovedas, G; Graziani, L. 2009(b). Influencia de varios factores sobre los índices físicos del grano de cacao en fermentación. *Agronomía Tropical* 59(1):81-88

AGRADECIMIENTO

Al mejor acompañante de mi vida: *Dios*

A mi asesor Mg. Polito Michael Huayama Sopla por compartir sus enseñanzas, por su exigencia, consejos y por su disponibilidad de tiempo.

A mis hermanos (Sandra, Tatiana y Dylan) por su acompañamiento y motivación.

Agradecer a mi amiga Elsa Magaly Zurita Rodríguez por siempre estar en las buenas y las malas, por los gratos momentos vividos juntas.

A mi abuela Vilma Peña y a mi tía Cesi Peña Núñez por sus consejos y por su presencia constante en mi vida.

A la Universidad Nacional de Jaén por formarme como profesional.

A la Dirección Regional de Agricultura, distrito de Jaén por apoyarme con la materia prima cacao para realizar la investigación.

DEDICATORIA

A mis padres: Andrés Aníbal Samaniego Aldaz y Donis Isabel Lalangui Peña; por ser mis guías, siempre mi impulso a seguir adelante ,por ese aliento que me dieron en todo momento, el sustento y por su apoyo incondicional.

ANEXOS

Los datos de la tabla 4 se procesaron en el software Statgraphics Centurion XVI.I, para analizar la varianza en el orden ajustado.

Tabla 11

ANOVA adicional para Variables en el Orden Ajustado

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Estado de madurez	0.0091125	1	0.0091125	0.04	0.8505
Frecuencia de remoción	0.1458	1	0.1458	0.60	0.4566
Tiempo de fermentación	2.03011	1	2.03011	8.29	0.0150
Modelo	2.18502	3			

Los datos de la tabla 3 y 4 fueron procesados en el software Statgraphics Centurion XVI.I, para graficar el pH respecto al tiempo de fermentación.

Tabla 12

pH vs Tiempo de fermentación

Tiempo de fermentación (Días)	Mínimo	Óptimo	Máximo
	Verde	Pintón	Verde
0	6.22	6.71	6.22
1	6.01	6.32	6.39
2	5.33	5.75	6.47
3	5.15	5.22	6.5
4			6.81
5			7.04
6			7.15
7			7.38

Los datos de la tabla 3 y 5 fueron procesados en el software Statgraphics Centurion XVI.I, para graficar el % de acidez con respecto al tiempo de fermentación

Tabla13

% Acidez vs Tiempo de fermentación

Tiempo de fermentación (Días)	Mínimo	Óptimo	Máximo
	Verde	Pintón	Verde
0	0.23	0.19	0.23
1	0.83	0.39	0.22
2	1.24	0.63	0.21
3	1.79	0.8	0.2
4			0.19
5			0.19
6			0.18
7			0.18

Los datos de la tabla 3 y 4 fueron procesados en el software Statgraphics Centurion XVI.I, para graficar el *L (grano entero) vs tiempo de fermentación.

Tabla 14

L vs Tiempo de fermentación*

Tiempo de fermentación (Días)	Mínimo	Optimo	Máximo
	Verde	Pintón	Verde
0	97.11	95.03	97.11
1	95.00	94.00	96.00
2	91.00	90.00	93.00
3	90.62	88.90	92.00
4			90.00
5			88.00
6			87.32
7			86.97

Los datos de la tabla 3 y 4 fueron procesados en el software Statgraphics Centurion XVI.I, para graficar el a^* (grano entero) vs tiempo de fermentación.

Tabla 15*a* vs Tiempo de fermentación*

Tiempo de fermentación (Días)	Mínimo	Óptimo	Máximo
	Verde	Pintón	Verde
0	-0.58	1.24	-0.58
1	2.41	3.53	1.12
2	4.63	6.27	2.69
3	5.81	7.52	4.86
4			9.23
5			11.36
6			13.41
7			15.29

Los datos de la tabla 3 y 4 fueron procesados en el software Statgraphics Centurion XVI.I, para graficar el b^* (grano entero) vs tiempo de fermentación.

Tabla 16*b* vs Tiempo de fermentación*

Tiempo de fermentación (Días)	Mínimo	Óptimo	Máximo
	Verde	Pintón	Verde
0	15.67	20.79	15.67
1	19.82	27.62	15.78
2	26.71	32.55	16.10
3	31.78	38.15	16.37
4			16.51
5			16.65
6			17.06
7			17.21

Los datos de la tabla 3 y 5 fueron procesados en el software Statgraphics Centurion XVI.I, para graficar el Lx^* (grano partido) vs tiempo de fermentación.

Tabla 17*Lx* vs Tiempo de fermentación*

Tiempo de fermentación (Días)	Mínimo	Optimo	Máximo
	Verde	Pintón	Verde
0	86.82	84.37	86.82
1	86.93	84.24	86.51
2	86.98	84.19	86.12
3	87.01	84.16	85.08
4			84.27
5			83.07
6			82.93
7			82.12

Los datos de la tabla 3 y 4 fueron procesados en el software Statgraphics Centurion XVII.I, para graficar el ax* (grano partido) vs tiempo de fermentación.

Tabla 18

ax vs Tiempo de fermentación*

Tiempo de fermentación (Días)	Mínimo	Óptimo	Máximo
	Verde	Pintón	Verde
0	14.38	17.15	14.38
1	16.52	19.61	14.53
2	18.39	23.02	14.94
3	19.17	25.92	15.67
4			15.93
5			16.35
6			17.12
7			17.70

Los datos de la tabla 3 y 5 fueron procesados en el software Statgraphics Centurion XVII.I, para graficar el bx* (grano partido) vs tiempo de fermentación

Tabla 19

bx vs Tiempo de fermentación*

Tiempo de fermentación (Días)	Mínimo	Óptimo	Máximo
	Verde	Pintón	Verde
0	22.34	28.81	22.34
1	8.33	20.43	26.64
2	4.68	3.51	33.72
3	3.60	-2.97	36.83
4			41.22
5			43.96
6			46.73
7			48.71

A continuación se presenta el % de humedad de los tres estados de madurez entre verde, pintón y maduro pasado dos días de fermentación sin haber realizado la remoción.

Tabla 20

% de humedad a dos días de iniciado la fermentación

Índice Madurez	Peso Inicial	Peso Final	%Humedad
verde	16.57gr	5.82gr	64.87%
Pintón	16.65gr	9.81gr	41.08%
Maduro	16.92gr	7.54gr	55.43%

Teniendo como referencia el diseño *estadístico de Box – Behnken* se calculó el % de humedad de los 15 tratamientos durante la fermentación.

Tabla 21

% de humedad de acuerdo al *diseño estadístico de Box – Behnken*

Tratamientos	Peso Inicial	Peso Final	% Humedad
T1	10.84gr	7.21gr	33.48%
T2	12.84 gr	9.06 gr	29.44%
T3	10.34 gr	7.56 gr	26.88%
T4	3.32 gr	1.9 gr	42.77%
T5	10.64gr	3.32gr	68.79%
T6	3.50gr	0.84	76.00%
T7	11.61gr	7.09gr	38.93%
T8	2.70gr	1.85gr	31.48%
T9	11.28gr	6.01	46.70%
T10	3.57gr	2.10gr	41.17%
T11	11.21gr	6.31gr	43.71%
T12	2.54gr	1.95gr	23.22%
T13	3.15 gr	1.50gr	52.38%
T14	4.04 gr	1.97gr	51.23%
T15	4.34gr	1.81gr	58.29%

PANEL FOTOGRÁFICO



Fotografía 12. Fermentación de cacao criollo en cajones de madera..



Fotografía 13. Remoción de los granos de cacao criollo.



Fotografía 14. Medición de la temperatura.



Fotografía 15. Determinación del % de acidez de los granos triturados de cacao.



Fotografía 16: Determinación del pH de los granos triturados de cacao.



Fotografía 17: Determinación de humedad mediante el método de la estufa.



Fotografía 18: granos de cacao enteros y partidos (visión computacional).



Fotografía 19: Secado de los granos de cacao.



Fotografía 20: cajones de cacao fermentado a los tres días.



Fotografía 21: cajones de cacao fermentado a los cinco días.



Fotografía 22: cajones de cacao fermentado a los 7 días.



Fotografía 23: Desarrollo de la investigación en el laboratorio de Tecnología de Alimentos de la Carrera Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional Jaén.