



# **Rendimiento y calidad de granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante visión computacional e imágenes hiperespectrales**

---

Polito Michael Huayama Soplá  
Elías Alberto Torres Armas  
Carla Guianella Samaniego Lalangui  
Yamira Iraisá Herrera García



**Tinta&Pluma**  
Editorial

---

Cada libro de Colección Tinta & Pluma es evaluado para su publicación mediante el sistema de dictaminación doble ciego por especialistas en la materia. Lo invitamos a ver el proceso de dictaminación de este libro transparentado en nuestra plataforma.



Ediciones Tinta & Pluma se especializa en la publicación de conocimiento científico en español e inglés en soporte de libro digital en las áreas de humanidades, ciencias sociales y ciencias exactas. Guía su criterio de publicación cumpliendo con las prácticas internacionales: dictaminación, comités y ética editorial, acceso abierto, medición del impacto de la publicación, difusión, distribución impresa y digital, transparencia editorial e indexación internacional.



**Polito Michael Huayama Sopa**

<https://orcid.org/0000-0002-4892-5331>

[polito.huayama@untrm.edu.pe](mailto:polito.huayama@untrm.edu.pe)

Instituto de Investigación en Negocios Agropecuarios INNA-UNTRM

Doctor en Ciencia e Ingeniería, Maestro en Administración y Dirección de Empresas e Ingeniero Agroindustrial, Profesor Principal a Tiempo Completo en la Facultad de Ingeniería Zootecnista, Agronegocios y Biotecnología (FIZAB) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), Perú. Consultor, formulador y coordinador de proyectos en I&D+I, investigador en áreas de seguridad alimentaria y economía circular.



**Elías Alberto Torres Armas**

<https://orcid.org/0000-0003-2774-1055>

[elias.torres@untrm.edu.pe](mailto:elias.torres@untrm.edu.pe)

Instituto de Investigación de Estudios Estadísticos y Control de Calidad IEC-UNTRM

Doctor en Planificación y Gestión, Maestro en Ciencias con mención en Estadística, Licenciado en Estadística, Profesor Principal a Tiempo Completo en la Facultad de Ingeniería Zootecnista, Agronegocios y Biotecnología (FIZAB) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM), Perú. Consultor estadístico, investigador en áreas de estadística, probabilidad, ciencias Agrícolas y Sociales.



**Carla Guianella Samaniego Lalangui**

<https://orcid.org/0000-0001-6733-8717>

[carla.samaniego@unj.edu.pe](mailto:carla.samaniego@unj.edu.pe)

Instituto de Investigación Cooperativo de Café y Cacao-UNJ

Ingeniera en Industrias Alimentarias, Coordinadora en Tecnologías Aplicadas y Emprendimientos de proyecto escalamiento y prototipado-La Caixa, Especialista en I&D+I del Instituto de Investigación Cooperativo de Café y Cacao de la Universidad Nacional de Jaén, Perú, con experiencia en ejecución, monitoreo y cierre de proyectos de innovación productiva de fondos concursables.



**Yamira Iraisá Herrera García**

<https://orcid.org/0000-0003-2881-5992>

ID: 57226379232

[yamira.herrera@untrm.edu.pe](mailto:yamira.herrera@untrm.edu.pe)

Instituto de Investigación de Estudios Estadísticos y Control de Calidad IEC-UNTRM

Instituto de Enfermedades Tropicales IET-UNTRM

Máster en atención Integral al Niño, Estudiante del Doctorado en Desarrollo Sustentable, Profesor Asociado a Tiempo Completo en la Facultad de Ciencias de la Salud (FACISA) de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Perú. Investigadora en áreas de la Salud.

**Rendimiento y calidad de granos de cacao  
(*Theobroma cacao* L.) mediante visión  
computacional e imágenes hiperespectrales**



Rendimiento y calidad de granos de cacao  
(*Theobroma cacao* L.) mediante visión  
computacional e imágenes hiperespectrales

**Autores**

Polito Michael Huayama Sopla  
Elías Alberto Torres Armas  
Carla Guianella Samaniego Lalangui  
Yamira Iraisá Herrera García

**Primera edición:** Tinta&Pluma 2023

Tinta&Pluma 2023, Guayaquil, Ecuador, Urbanización Puerto Azul, Mz 20 Villa 12,  
fitogonzal@gmail.com  
<https://editorialtintaypluma.com/index.php/etp/index>

**ISBN: 978-9942-619-14-3**

**DOI: <https://doi.org/10.53887/etp.vi>**



Obra revisada previamente por la modalidad doble par ciego, en caso de requerir información sobre el proceso comunicarse con la editorial.  
Queda prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros), sin la previa autorización por escrito del titular de los derechos de autor, bajo las sanciones establecidas por la ley. El contenido de esta publicación puede ser reproducido citando la fuente.  
El trabajo publicado expresa exclusivamente la opinión de los autores, de manera que no compromete el pensamiento ni la responsabilidad de la editorial

# **Rendimiento y calidad de granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante visión computacional e imágenes hiperespectrales**

**Polito Michael Huayama Soplá  
Elías Alberto Torres Armas  
Carla Guianella Samaniego Lalangui  
Yamira Iraisá Herrera García**

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b> .....	3
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	4
<b>II. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	10
<b>2.1. Análisis de visión computacional</b> .....	12
<b>2.2. Análisis de imágenes hiperespectrales</b> .....	13
<b>2.3. Análisis fisicoquímicos</b> .....	14
<b>III. RESULTADOS</b> .....	15
<b>IV. DISCUSIÓN</b> .....	27
<b>V. CONCLUSIONES</b> .....	33
<b>VI. PROPUESTA</b> .....	35
<b>6.1. Objetivo general</b> .....	37
<b>6.2. Objetivos específicos</b> .....	38
<b>6.3. Programa sustentables de la producción de cacao</b> .....	38
<b>6.4. Programa de monitoreo y control de calidad de la producción de cacao</b> .....	39
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	41

## PRÓLOGO

El propósito de este libro fue evaluar el efecto de la variedad, frecuencia de remoción y tiempo de fermentación en el rendimiento y calidad de granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante visión computacional e imágenes hiperespectrales, se aplicó el diseño experimental de Box-Behnken. Las variables evaluadas fueron variedades de cacao: CCN-51-Rojo, CCN-51-Amarillo y Nacional, frecuencia de remoción cada 12, 24 y 36 horas y tiempo de fermentación 4, 6 y 8 días, se tomaron muestras selectivas de granos de cacao de cada tratamiento para el análisis fisicoquímico. Los resultados evidencian que la variedad de cacao CCN-51-Rojo es de mayor rendimiento, los valores optimizados de pH = 5.244 y % de acidez de 2.292 se obtuvieron trabajando con variedad de cacao CCN-51-amarillo, frecuencia de remoción cada 24 horas y fermentado por 6 días, el análisis de visión computacional varían linealmente para granos enteros:  $\Delta L^*$  de blanco a negro,  $\Delta a^*$  de verde a rojo,  $\Delta b^*$  de azul a verde, para granos partidos:  $\Delta Lm^*$  de negro a blanco,  $\Delta am^*$  de roja a verde,  $\Delta bm^*$  de amarillo a azul, y el análisis de imágenes hiperespectrales determinó que el mejor modelo empleando PLSR (regresión de mínimos cuadrados parciales) para pH se obtiene con pre-tratamiento de 1era derivada, con  $R^2 = 0.85$ , RMSEC = 0.20 de calibración,  $R^2 = 0.69$ , RMSEVC = 0.28 de validación cruzada y  $R^2 = 0.78$ , RMSEP = 0.25, y para % de acidez se obtiene con pre-tratamiento de 2da derivada, con  $R^2 = 0.89$ , RMSEC = 0.30 de calibración,  $R^2 = 0.73$ , RMSEVC = 0.45 de validación cruzada y  $R^2 = 0.63$ , RMSEP = 0.55. Se obtuvo una técnica de predicción de buen desempeño, que predice el rendimiento y la calidad de granos de cacao que podría reemplazar a la prueba de corte convencional.

# I. INTRODUCCIÓN



El cacao es una fruta de origen tropical que proviene del árbol de cacao y que es el componente básico del chocolate. Las semillas de cacao se caracteriza por ser nutritivo y funcional rico en fibra, vitaminas y minerales (Romero, 2016), y son las que se emplean en la elaboración del chocolate y derivados (Beg *et al.*, 2017).

Las actividades realizadas en la cadena productiva del cacao es el sustento tradicional de numerosas familias de la parte norte del Perú. Alrededor del 20% de las exportaciones de cacao y derivados las realizan cooperativas u otros tipos de organizaciones. El 56 % de la producción de cacao en el Perú corresponde a cacao corriente o común (CCN-51 + Forastero), mientras que el 44 % corresponde a cacao fino (Criollo + Nativo) (MINAGRI, 2014), siendo el Perú el centro de biodiversidad del cacao en el mundo, su centro de origen es la hoya amazónica (Geographic, 2020).

Para que las mazorcas de cacao se convierten en barras de chocolate, estas pasan por muchas fases, y no hay duda que las personas que las fabrican tienen un papel muy importante en el proceso, los pasos iniciales y más importantes en la preparación del chocolate ocurren en la finca, donde se cultiva y se procesa el cacao (Kumari *et al.*, 2018).

Una vez recolectados los frutos, se extraen las semillas, se fermentan y se secan para obtener el cacao en grano. En el proceso industrial se realizan las operaciones de limpieza, descascarillado, tostado, y molturación, para obtener la pasta de cacao que es el principal ingrediente del chocolate (Moreira *et al.*, 2018).

La calidad y el desarrollo del sabor del cacao se ve afectado en gran parte por las diferentes etapas de la cadena productiva en especial por la fermentación y secado (Somarriba, 2012), la fermentación del mucilago que envuelven los granos, son estimuladas por microorganismos que afectan a la pulpa, generando reacciones internas controladas por las enzimas contenidas en los tejidos de los cotiledones (Guillín y Lara, 2010), y que afecta componentes como aminoácidos libres, péptidos y azúcares (Castro-Alayo *et al.*, 2019).

Durante la fermentación y posterior proceso de secado, el contenido de polifenol (incluidas las antocianidinas) disminuye a medida que algunos se filtran fuera de los granos, mientras que otros se oxidan y polimerizan a compuestos insolubles de alto peso molecular (taninos) (Afoakwa *et al.*, 2013).

Además, durante la fermentación se produce la acumulación de ácido la cual reduce el nivel de pH, permitiendo la inactivación del embrión, dando lugar a reacciones enzimáticas que originan precursores del sabor, que conduce a cambios en el color interno de los granos de cacao secos, desde el gris oscuro (pizarroso) del grano sin fermentar hasta el color púrpura oscuro de los granos poco fermentados hasta el color marrón del grano completamente fermentado (Castro-Alayo *et al.*, 2019), a medida que avanza la fermentación, aparecen crestas en la superficie del embrión y se vuelven más grandes y profundas. Por lo tanto, es importante identificar estos cambios para determinar si los granos de cacao están fermentados adecuadamente, originando muestras de alta calidad y sin defectos (Kongor *et al.*, 2016).

El cambio de color del grano de cacao durante la fermentación se debe a la hidrólisis de la antocianina, la posterior oxidación de las agliconas resultantes a compuestos quinónicos propios de la fermentación (Álvarez *et al.*, 2010), también permite la evaluación física de la calidad del grano de cacao mediante la inspección visual y la prueba de corte para determinar el grado de fermentación método simple y de fácil análisis para el personal experto en el proceso (Kongor *et al.*, 2013).

La prueba de corte consiste en partir a la mitad un número determinado de granos, generalmente 300 granos por tonelada, provenientes de una muestra representativa. El corte del grano debe ser en forma longitudinal para exponer la máxima superficie del interior del cotiledón, y se evalúa a los granos, dispuestos en un tablero de inspección (generalmente con manchas para 100 granos), que se analizan individualmente (CAOBISCO/ECA/FCC, 2005); a pesar de ser simple y realizado por personal capacitado, este

método es posiblemente preciso, ya que es laborioso, requiere mucho tiempo y se considera subjetivo y difícil de estandarizar (Kongor *et al.*, 2013).

Por lo tanto, la industria del cacao requiere una técnica rápida y precisa que pueda clasificar el grado de fermentación del cacao a bajo costo y ampliamente estandarizado (Barbin *et al.*, 2021). La visión por computadora es una alternativa para la evaluación de la calidad de los alimentos, como carne y sus derivados (Nolasco-Perez *et al.*, 2019), frutas y vegetales (Pereira *et al.*, 2018), nueces (Mathanker *et al.*, 2011), así como granos (Szcypinski y Zapotoczny, 2012). La combinación de análisis de imágenes con estadísticas multivariadas se ha convertido en una herramienta poderosa para abordar varios problemas en el sector alimentario (Barbin *et al.*, 2021).

Actualmente, varios autores vienen aplicando las técnicas de visión por computadora e imágenes hiperespectrales como método de control de la calidad de alimentos dentro de ellos tenemos: Empleando la visión computacional se realizaron estudios en rodajas de yacón mínimamente procesadas, se almacenaron a 5 °C. Los cambios de color fueron estimados cada 2 h, durante 26 h, obteniendo sus parámetros de color. L \* disminuyó de 65.9 a 60.8, con una tendencia a un color negro; a \* aumentó de 7.3 a 17.7, acercándose a un color rojo; b \* aumentó de 35.1 a 41.5, presentando una tendencia a un color amarillo. Además, C \* aumentó de 35.9 a 40.1, H \* disminuyó de 78.2 a 66.9 y DE \* aumentó de 2.6 a 13.2. Errores bajos calculados ( $eL * \frac{1}{4} 5.001\%$ ,  $y ea * \frac{1}{4} 2.287\%$ ,  $y eb * \frac{1}{4} 4.314\%$ ) (Saldaña *et al.* 2014).

También se diseñó e implementó un dispositivo de visión por computadora (CVS) para la medición del color en alimentos de superficie plana (software y hardware), que constaba de dos fases: a) adquisición de imágenes y b) procesamiento y análisis de imágenes. Tanto el algoritmo como la interfaz gráfica (GUI) se desarrollaron en Matlab. La calibración CVS se realizó utilizando un colorímetro convencional (Modelo CIEL \* a \* b \*), donde se estimaron

los errores de los parámetros de color:  $eL^* = 5.001\%$ ,  $y\ ea^* = 2.287\%$ ,  $y\ eb^* = 4.314\%$  (Saldaña *et al.*, 2013).

Se estudió la capacidad de las imágenes hiperespectrales para predecir los cambios en el contenido de antocianinas en las uvas para vino durante la maduración. Las imágenes fueron grabadas por un sistema de imágenes hiperespectrales con un rango espectral de 900 a 1700 nm. El contenido de antocianinas se midió por el método del pH diferencial. Se desarrolló un modelo cuantitativo utilizando la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR) o la regresión de vectores de soporte (SVR) para calcular el contenido de antocianinas. El mejor modelo se obtuvo usando SVR, produciendo un coeficiente de validación (P-R2) de 0.9414 y un error cuadrático medio de predicción (RMSEP) de 0.0046, mayor que el modelo PLSR, que tenía un P-R2 de 0.8407 y un RMSEP de 0.0129 (Chen *et al.*, 2015)

A los granos de cacao violeta seco (endospermo, cotiledón y grietas), se analizaron el índice de reflectancia de antocianina (ARI2), empleando imágenes hiperespectrales, durante siete días se correlacionando con los datos de pH, humedad durante el proceso bioquímico. Mediante la correlación de Pearson se determinó la relación inversa entre el promedio de ARI2 de las grietas y granos de cacao de buena calidad (Vidarte, 2016).

Se usó imágenes hiperespectrales, con el fin de tener un análisis rápido y preciso del proceso de fermentación convencional de granos de cacao con la finalidad de determinar el comportamiento de la fermentación. Se estudió el índice de reflectancia de antocianina (ARI2) y la relación de las bandas espectrales de absorción (RBEA) de la imagen hiperespectral de los granos de cacao durante la fermentación, correlacionando con los valores de humedad, pH y temperatura (Reyes, 2016).

Por lo tanto, el objetivo de la investigación es emplear la visión computacional e imágenes hiperespectrales como un método preciso y rápido para clasificar los granos de cacao

durante la fermentación y determinar la calidad y que podría sustituir la prueba de corte convencional que se emplea en la actualidad.

## **II. MATERIALES Y MÉTODOS**



Se trabajó con tres variedades de cacao (*Theobroma cacao L.*): Nacional, CCN-51-Amarillo y CCN-51-Rojo; producido en la provincia de Jaén, región Cajamarca, las muestras cosechadas fueron trasladadas al Laboratorio de Ingeniería de Procesos Agroindustriales de la Universidad Nacional de Trujillo, se clasificó de acuerdo a: variedad, tamaño, estado de madurez y daños físicos, las mazorcas fueron lavadas y secadas, se extrajeron los granos realizando un corte horizontal a la mazorca, los granos fueron pesados (rendimiento) y analizados (pH, % de acidez, % de humedad, visión computacional e imágenes hiperespectrales). (Tabla 1); se acondicionó y codificó 15 cajones de madera (22 x 12 x 9) cm<sup>3</sup>, de un kg de capacidad, de acuerdo al diseño de superficie Box-Behnken (Tabla 3), se colocó en el cajón los granos de cacao clasificado de acuerdo a las variables de estudio: variedad de cacao, frecuencia de remoción (a partir de las 48 horas de haber iniciado la fermentación) y fermentación (Tabla 2). Luego de haber realizado todos los ensayos experimentales, y con los datos de pH y % de acidez, que son las variables respuestas; se realizó el análisis correspondiente para obtener los valores óptimos de las variables estudiadas (Anexo 6 al 9).

Usando la técnica de Optimización de Respuesta Superficial aplicado a las variables: variedades de cacao, frecuencia de remoción y tiempo de fermentación, se determinó el nivel óptimo y sus relaciones se ajustaron al modelo polinomial cuadrático siguiente. (Montgomery, 2004)

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

Donde:

Z = Variable dependiente (pH) y (% de acidez)

A, B, C = Variables independientes (variedades de cacao, frecuencia de remoción y tiempo de fermentación)

b<sub>0</sub> = Coeficiente de regresión en el punto central

b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>, b<sub>3</sub> = Coeficientes lineales

$b_4, b_5, b_6$  = Coeficientes de interacción de segundo orden

$b_7, b_8, b_9$  = Coeficientes cuadráticos.

Se estimó las curvaturas para las variables dependientes e independientes en 15 niveles empleando Box-Behnken, mediante el diseño factorial fraccional (Montgomery, 2004).

Usando la técnica de regresión múltiple se calculó, los coeficientes del modelo polinomial y se escribió las ecuaciones XY polinomiales, usadas para generar respuestas y líneas de contorno para las diferentes combinaciones de los niveles de las variables, empleando la herramienta STATGRAPHICS Centurión XVI.

**2.1. Análisis de visión computacional,** Durante la fermentación se analizaron a los granos de cacao, (enteros y partidos) mediante visión computacional para obtener los valores de  $L^*a^*b^*$  y  $L^*am^*bm^*$ , las imágenes fueron tomadas de una cámara digital Canon T4I de 18MP, colocada dentro de una caja de madera de  $(1 \times 1 \times 1) m^3$ , cerrada de color negro la parte interna acondicionada con cuatro fluorescentes para la iluminación y con un soporte para la cámara, conectada con un cable USB a la parte externa con una computadora de escritorio de donde se monitoreaba la correcta posición y toma fotográfica de la muestra (*Figura 1*), las fotos se editaron en Paint y fueron recortadas un segmento de cada muestra, para luego ser procesada en el MATLAB R2017a, de acuerdo a algoritmo (Anexo 10), diseñado para determinar los valores numéricos de  $L^* a^* b^*$ . El parámetro  $L^*$  (luminosidad) es un atributo por el cual una superficie emite más o menos luz y puede oscilar entre 0 (negro absoluto) y 100 (blanco absoluto). Los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  representan la cromaticidad, donde  $a^*$  define el componente rojo-verde (rojo para valores positivos y verde para valores negativos) y el parámetro  $b^*$  define el componente amarillo-azul (amarillo para valores positivos y azul para valores negativos) (León *et al.* 2006). Con la información obtenida se realizó las *Figuras 5 y 6*, con la finalidad de evaluar la variación del color del cacao durante

la fermentación mediante  $L^*a^*b^*$ , obteniendo las ecuaciones y  $R^2$  correspondiente utilizando Microsoft office (Excel).

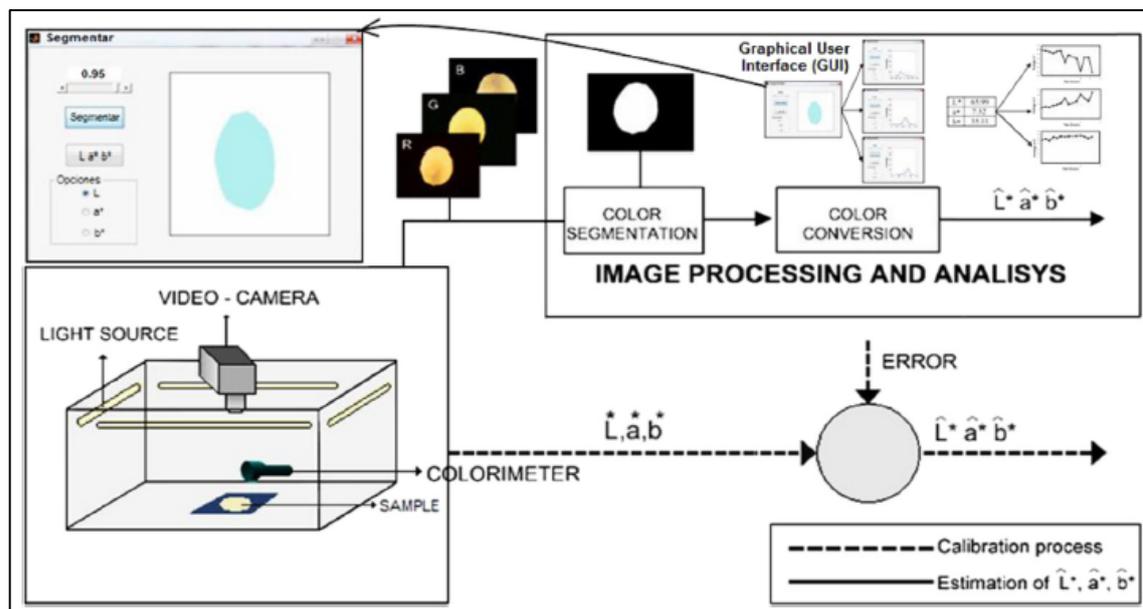


Figura 1. Esquema para convertir imágenes RGB a unidades  $L^* a^* b^*$  usando CVS (Saldaña *et al.* 2014)

**2.2. Análisis de imágenes hiperespectrales,** Durante la fermentación, los granos de cacao (enteros y partidos por la mitad), fueron analizados mediante el sistema de imagen hiperespectrales (equipo Headwall) con un rango espectral de 900 a 1700 nm, para predecir los cambios en el contenido de pH y % de acidez de fermentación de tres variedades de cacao Tabla 3. Previa calibración del sistema se inició con la preparación de la muestra codificando, se procedió a analizar reportando la imagen a una computadora de acuerdo a los parámetros recomendados mediante el software HyperSpec III (E51001vs64), en una memoria USB fueron pasadas a otra computadora donde las imágenes fueron segmentadas y analizadas con el software MATLAB R2016a, Los resultados numéricos obtenidos fueron copiados en una hoja Excel y luego analizadas en el software The Unscrambler x10.4, según el modelo PLSR (Regresión de mínimos cuadrados parciales) se obtuvo los valores de pH y % de acidez predichos, los resultado se muestran en las Figuras 7 y 8.

### 2.3. Análisis fisicoquímicos

- ❖ **Determinación del pH**, El pH-metro SI Analytics (Lab 875) fue calibrado con soluciones buffer de pH 4.01 y 7.00 para su correcta medida, luego se pesó 10 g de granos de cacao, se trituro en un mortero, se añadió 100 mL de agua destilada, con una bagueta se homogenizó y se filtró, el líquido fue trasladado en un beaker a un agitador magnético para homogeneizar la muestra, introducido el electrodo se reportó la lectura del pH a temperatura ambiente, Anexo 5.
- ❖ **Determinación de acidez titulable total**, se trituro en un mortero 10 g de cacao, se añadió 250 mL de agua destilada, con una bagueta se homogenizó y se filtró, se depositó en un Erlenmeyer 50 mL de la solución más 1 mL de fenolftaleína al 1%, colocado un agitador magnético se tituló con hidróxido de sodio 0.1 N hasta que aparezca una tonalidad rosa que persista por 30 segundos, pH 8.2 y se procedió a realizar la lectura, Fotografía 23, se calculó la acidez como porcentaje de ácido acético (0.060) predominante según la ecuación:

$$\% \text{ acidez} = \frac{(mL \text{ NaOH})(N)(meq \text{ de ácido})(Vol. de dilución)}{(mL \text{ de muestra})(mL \text{ alicuota)}} \times 100$$

- ❖ **Contenido de humedad**, para medir el % de humedad de granos de cacao se empleó el analizador automático de humedad A&D ML-51, con el equipo prendido se colocó un fragmento del grano en el equipo, se registró el peso inicial, con el sonido de la alarma se concluyó y se registró el peso final expresado en % de humedad, Figura 12.

### **III. RESULTADOS**



El rendimiento promedio de las mazorcas de cacao empleado en la investigación fue: CCN-51-Rojo 27.82 % de grano y 72.18 % de cascara, CCN-51-Amarillo 25.63 % de grano y 74.37 % de cascara y Nacional 23.51 % de grano y 76.49 % de cascara (Anexo 1).

Con el analizador automático de humedad A&D ML-51, se determinó la humedad de muestras de cacao en estado fresco y fermentado que se empleó en el trabajo de investigación (Tabla 1 y 3).

En la Tabla 1, se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos y visión computacional de las tres variedades de cacao empleado en la investigación en estado fresco.

Tabla 1  
*Análisis fisicoquímico y de visión computacional de los granos de cacao fresco.*

Variedad	pH	% Acidez	% Humedad	L*	a*	b*	Lm*	am*	bm*
CCN-51-Rojo	6.720	0.552	24.96	92.9046	5.3115	17.9359	91.9557	5.3573	23.9550
CCN-51-Amarillo	7.025	0.558	29.36	97.8549	0.6523	7.8807	92.0560	5.4879	22.5585
Nacional	7.054	0.316	29.19	93.3982	4.0573	20.3791	95.2796	6.7845	0.6442

L\*, a\* y b\*: Coordenadas de visión computacional grano entero.

Lm\*, am\* y bm\*: Coordenadas de visión computacional grano partido.

La Tabla 2, muestra los valores de las variables estudiadas en el proceso de fermentación del cacao.

Tabla 2  
*Variables evaluadas con Box-Behnken.*

Concentración	Variedad de cacao X <sub>1</sub>	Frecuencia de remoción (horas) X <sub>2</sub>	Fermentación (días) X <sub>3</sub>
Alta (+)	21	36	8
Media (0)	14	24	6
Baja (-)	7	12	4

Variedad de cacao Nacional = 7, CCN-51-Amarillo = 14 y CCN-51-Rojo = 21,

El proceso de fermentación del cacao fue evaluado según los 15 niveles empleando Box-Behnken, mediante el diseño factorial fraccional y se realizaron los cálculos usando la técnica de regresión múltiple.

Tabla 3

*Rendimiento promedio de pH, % Acidez, % Humedad y CVC, aplicando el diseño experimental Box-Behnken.*

Niveles	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	pH	% Acidez	% Humedad	L*	a*	b*	Lm*	am*	bm*
1	7	12	6	6.221	0.673	38.21	82.2023	20.7581	32.1521	95.9414	2.6346	12.2623
2	7	36	6	6.340	0.809	34.91	92.2872	7.4239	15.7906	95.0852	4.5347	9.5831
3	21	12	6	5.760	1.949	29.20	91.2966	7.2570	20.6957	94.0151	9.3653	-1.4590
4	21	36	6	5.870	1.653	25.53	85.8361	10.6495	49.3997	95.1399	5.3199	6.7296
5	7	24	4	6.030	0.907	37.80	88.5584	7.3746	41.1127	90.5088	6.0716	33.9187
6	7	24	8	6.385	0.599	29.87	91.2587	8.7354	16.5021	85.8851	12.0017	43.2337
7	21	24	4	5.995	1.296	39.59	81.1816	19.3839	49.1156	96.1869	3.7916	5.9136
8	21	24	8	6.100	1.208	30.84	82.9475	18.1643	37.3819	95.8191	4.0132	7.2109
9	14	12	4	5.935	1.524	30.40	77.0132	6.7979	43.8458	91.3820	5.1514	30.0026
10	14	12	8	6.060	1.428	36.45	84.4580	14.0944	43.8677	94.2057	4.1248	15.8273
11	14	36	4	6.162	0.616	40.58	84.4932	12.3141	55.2402	94.7707	4.7786	11.0426
12	14	36	8	6.184	0.924	27.36	87.9569	12.7519	23.1607	96.2792	3.5764	6.2334
13	14	24	6	5.648	1.824	35.86	87.1567	9.6749	42.2297	94.4657	3.6453	16.0808
14	14	24	6	5.244	2.292	27.73	87.1358	9.8923	41.3938	96.7053	3.0744	5.7240
15	14	24	6	5.475	2.075	27.36	87.4189	9.0863	42.9455	95.2827	4.8212	7.0321

L\*, a\* y b\*: Coordenadas de visión computacional grano entero CVC.

Lm\*, am\* y bm\*: Coordenadas de visión computacional grano partido CVC.

En la Tabla 3 se muestra los resultados del análisis fisicoquímico (pH, % de acidez y % de humedad) y análisis de visión computacional para grano entero ( $L^* a^* b^*$ ) y para grano partido ( $Lm^* am^* bm^*$ ) evaluadas. Se observa que el tratamiento con mayor valor de pH (6.385) y menor valor de % de acidez (0.599) es el 6 (variedad de cacao nacional, con una frecuencia de remoción cada 24 horas, fermentado por 8 días) y el que obtuvo el menor valor de pH (5.244) y mayor valor de % de acidez (2.292) es el 14 (variedad de cacao CCN-51-Amarillo, con una remoción cada 24 horas, fermentado por 6 días), en concordancia con Utami *et al.* (2015), que el tiempo para la fermentación de granos de cacao criollo es de 2-3 días, mientras que para el cacao forastero es de 6-8 días y Ortiz de Bertorelli *et al.* (2009), la diferencia de tiempo de fermentación del cacao se ve relacionado directamente al tipo de cacao.

Aplicando el software STATGRAPHICS Centurión XVI, y por diseño de Box-Behnken, Tabla 3, se generó el resultado del análisis de varianza (ANOVA) del modelo mostrados en las Tablas 4 y 5.

Tabla 4

*Análisis de la varianza de la optimización del pH en función de variedad de cacao, frecuencia de remoción y tiempo de fermentación mediante superficie de respuesta.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Variedad de cacao	0.195625	1	0.195625	6.84	0.0473
B:Frecuencia de remoción	0.04205	1	0.04205	1.47	0.2794
C:Fermentación	0.0460561	1	0.0460561	1.61	0.2602
AA	0.371427	1	0.371427	12.99	0.0155
AB	0.00002025	1	0.00002025	0.00	0.9798
AC	0.015625	1	0.015625	0.55	0.4930
BB	0.279062	1	0.279062	9.76	0.0261
BC	0.00265225	1	0.00265225	0.09	0.7729
CC	0.46445	1	0.46445	16.25	0.0100
Error total	0.14294	5	0.0285881		
Total (corr.)	1.4138	14			

Tabla 5

*Análisis de la varianza de la optimización % de acidez en función de variedad de cacao, frecuencia de remoción y tiempo de fermentación mediante superficie de respuesta.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Variedad de cacao	1.21524	1	1.21524	11.93	0.0182
B: Frecuencia de remoción	0.308898	1	0.308898	3.03	0.1421
C: Fermentación	0.004232	1	0.004232	0.04	0.8465
AA	0.769729	1	0.769729	7.56	0.0403
AB	0.046656	1	0.046656	0.46	0.5285
AC	0.0121	1	0.0121	0.12	0.7444
BB	0.417054	1	0.417054	4.10	0.0989
BC	0.040804	1	0.040804	0.40	0.5546
CC	1.34962	1	1.34962	13.25	0.0149
Error total	0.509211	5	0.101842		
Total (corr.)	4.36429	14			

Los resultados de pH y % de acidez, fueron evaluados estadísticamente a través de las pruebas paramétricas: Análisis de Varianza para comparar los tratamientos y determinar el mejor tratamiento. Los resultados indican que el tratamiento 14 (variedad de cacao nacional, con una frecuencia de remoción cada 24 horas, fermentado por 8 días), es el que mejores condiciones de fermentación ha logrado para obtener granos de cacao de calidad.

De la Tabla 4, el análisis de varianza para la optimización de pH expresa que la variedad de cacao tiene un efecto significativo en la fermentación adecuada medida mediante el contenido de pH de los granos fermentados (valor-p de 0.0473) al igual que sus efectos cuadráticos. Debido a que tiene los p-valores inferiores a 0,05 con un nivel de confianza del 95,0% se consideran significativos para el modelo matemático (Méndez, 2007). Por otro lado, la frecuencia de remoción y los días de fermentación del cacao (valor-p de 0.2794 y 0.2602, respectivamente) no tiene efecto significativo en el pH.

De la Tabla 5, El análisis de varianza para la optimización % de acidez expresa que la variedad de cacao tiene un efecto significativo en la fermentación adecuada medida mediante el % de acidez de los granos fermentados (valor-p de 0.0182) al igual que sus efectos cuadráticos. Debido a que tiene los p-valores inferiores a 0,05 con un nivel de confianza del 95,0% se consideran significativos para el modelo matemático (Méndez, 2007). Por otro lado,

la frecuencia de remoción y los días de fermentación del cacao (valor-p de 0.1421 y 0.8465, respectivamente) no tiene efecto significativo en el % de acidez.

Gutiérrez y De la Vara (2008) señalan que el estadístico  $R^2$  cuanto más cerca esté al 100% los modelos propuestos se adaptan mejor a los datos reales. En lo que respecta al estadístico  $R^2$ , de la investigación, indica que el modelo explica el 89.8896 % para pH y 88.3323 % para % acidez de la variabilidad de la aceptabilidad, dicho indicador refleja que los datos se ajustan a estos modelos:

$$\text{pH} = 10.4176 - 0.176149 \times A - 0.0787847 \times B - 0.937812 \times C + 0.00647279 \times A^2 - 0.0000267857 \times A \times B - 0.00446429 \times A \times C + 0.00190914 \times B^2 - 0.00107292 \times B \times C + 0.0886667 \times C^2$$

$$\% \text{ Acidez} = - 6.36175 + 0.323869 \times A + 0.0884028 \times B + 1.64625 \times C - 0.00931803 \times A^2 - 0.00128571 \times A \times B + 0.00392857 \times A \times C - 0.00233391 \times B^2 + 0.00420833 \times B \times C - 0.151146 \times C^2$$

Dónde:

A: Variedad de cacao

B: Frecuencia de remoción

C: Fermentación

Respuesta Optimizada: (Meta: minimizar pH), Valor óptimo = 5.42878

Tabla 6  
*Valores óptimos de las variables independientes para pH.*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Variedad de cacao	7.0	21.0	15.6579
Frecuencia de remoción	12.0	36.0	22.3765
Fermentación	4.0	8.0	5.81783

Respuesta Optimizada: (Meta: maximizar % de acidez), Valor óptimo = 2.19196

Tabla 7  
*Valores óptimos de las variables independientes para % de acidez.*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Variedad de cacao	7.0	21.0	17.2845
Frecuencia de remoción	12.0	36.0	19.5358
Fermentación	4.0	8.0	5.94259

En la Figura 2 y 3 se presenta la relación entre las variables o factores en los valores de pH y % de acidez de la fermentación del cacao, dicha gráfica muestra una representación de superficie de respuestas de forma alabeada y de variación local suave (Gutiérrez y De la Vara, 2008). Las superficies de respuesta Figura 2 refleja que trabajando con variedad de cacao CCN-51-Amarillo (Figura 2) se obtiene la mínima concentración de pH que alcanza a 5.42878, con una frecuencia de remoción cada 24 horas, fermentada por 6 días y Figura 3 refleja que trabajando con variedad de cacao CCN-51-Amarillo se obtiene la máxima concentración de % de acidez que alcanza a 2.19196, con una frecuencia de remoción cada 24 horas, fermentada por 6 días.

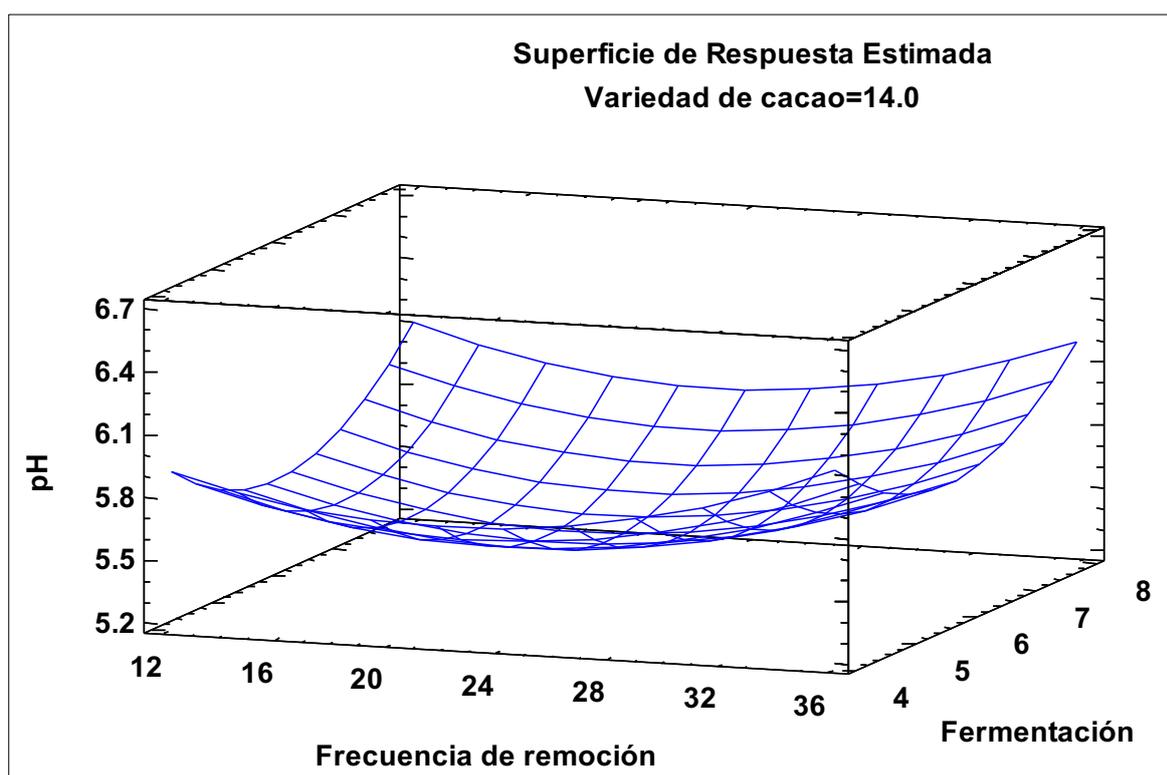


Figura 2. Superficie respuesta de pH en función frecuencia de remoción – fermentación (variedad de cacao: 14). Valor óptimo de pH = 5.42878.

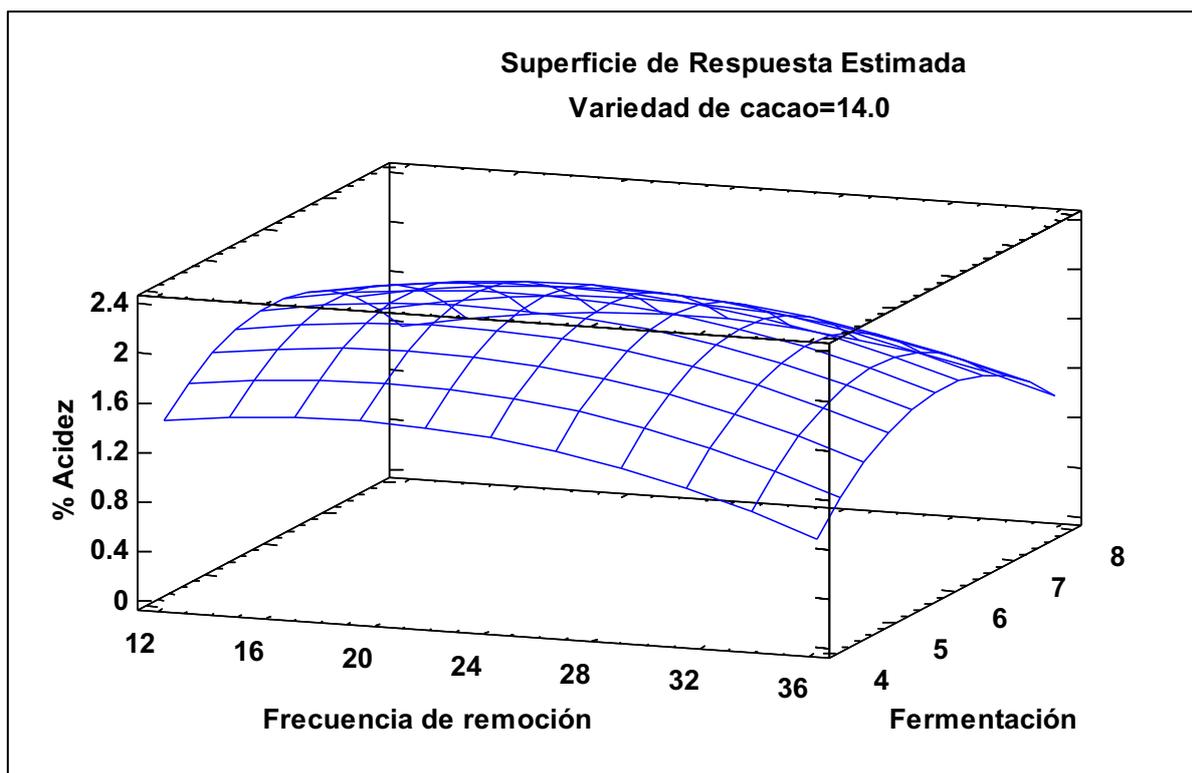


Figura 3. Superficie respuesta de % de acidez en función frecuencia de remoción – fermentación (variedad de cacao: 14). Valor óptimo de % de acidez = 2.19196

Con la respuesta Optimizada de  $\text{pH} = 5.42878$ , en función de las variables: variedad de cacao CCN-51-Amarillo, frecuencia de remoción cada 24 horas y fermentado por 6 días (Figura 2 y 3), se procedió a elaborar las Figuras 4 y 5, correspondiente al ensayo 14 de la Tabla 3.

En la Figura 4, se observa la variación lineal del color de granos enteros de cacao del día 0 al día 6 tiempo que duró la fermentación,  $\Delta L^*$  (97.85-87.14) de blanco a negro,  $\Delta a^*$  (0.65-9.89) de verde a rojo y  $\Delta b^*$  (7.88-41.39) de azul a verde, cuya ecuación y  $R^2$  se evidencia en la figura correspondiente, en la que los valores predichos se ajustan a los valores observados.

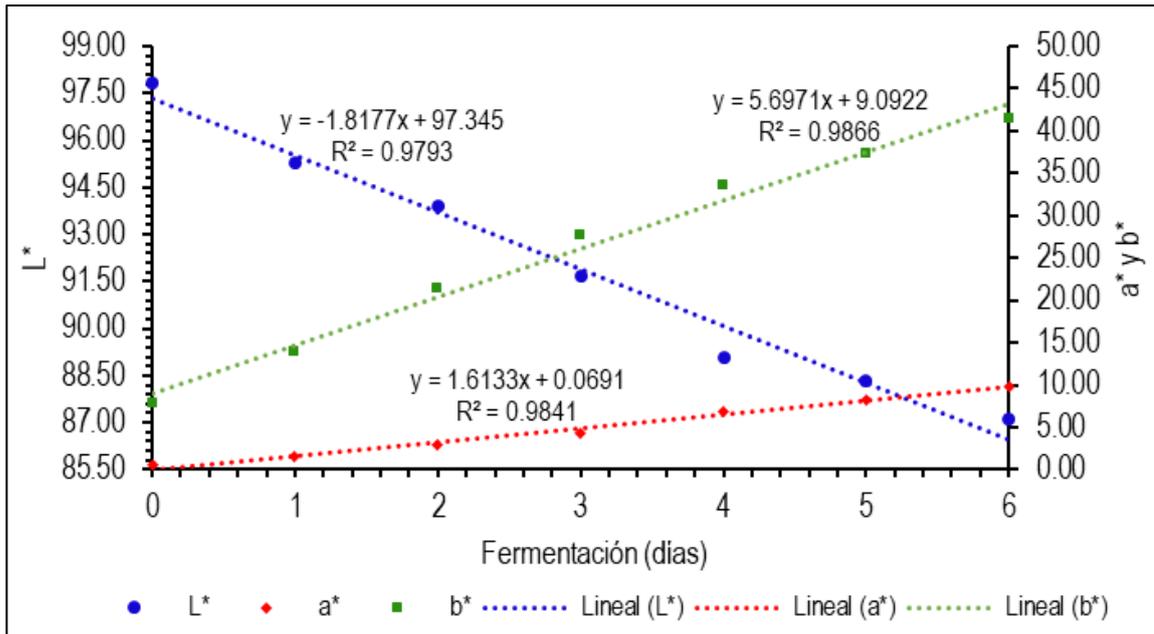


Figura 4.  $\Delta$  de los valores de  $L^*a^*b^*$  respecto a la fermentación (días)

En la Figura 5, se observa la variación lineal del color de granos partidos de cacao del día 0 al día 6 tiempo que duró la fermentación,  $\Delta Lm^*$  (92.06-96.71) de negro a blanco,  $\Delta am^*$  (5.49-3.07) de roja a verde y  $\Delta bm^*$  (22.56-5.72) de amarillo a azul, cuya ecuación y  $R^2$  se evidencia en la figura correspondiente en la que los valores predichos se ajustan a los valores observados, e inversamente proporcional al  $L^*a^*b^*$  de granos enteros.

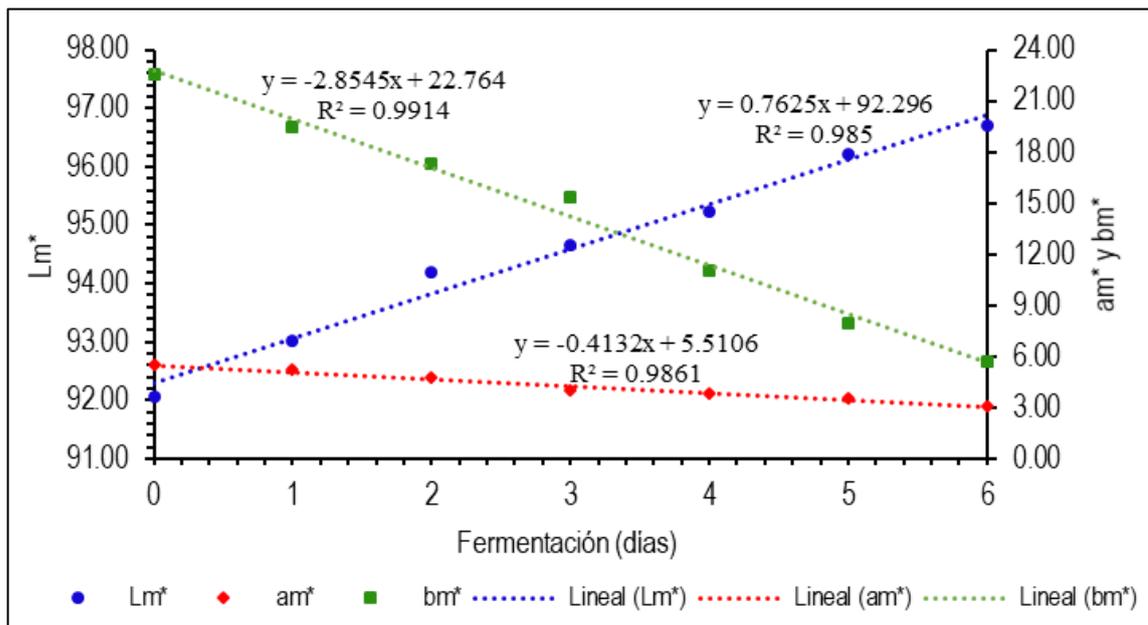
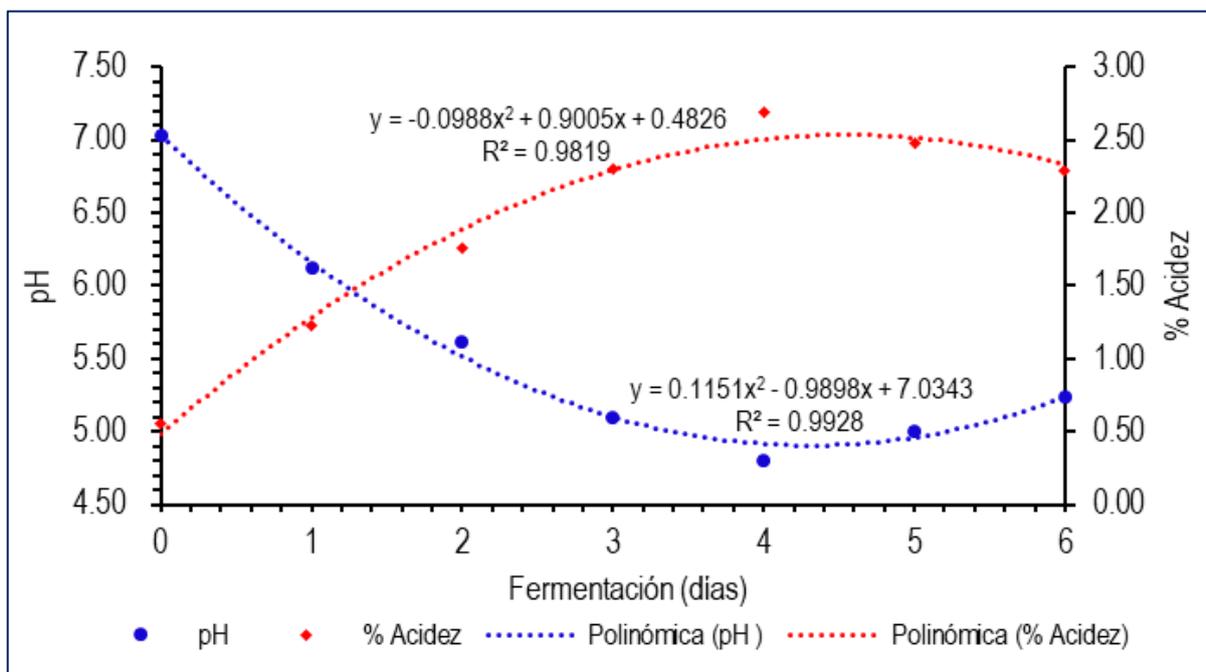


Figura 5.  $\Delta$  de los valores de  $Lm^*am^*bm^*$  respecto a la fermentación (días)

En la *Figura 6*, se observa la variación polinómica del pH y % de acidez de granos de cacao del día 0 al día 6 tiempo que duró la fermentación,  $\Delta$  pH disminuye y  $\Delta$  % de acidez se incrementa ambos son inversamente proporcionales, la ecuación polinomial y  $R^2$  se evidencia en la figura correspondiente en la que los valores predichos se ajustan a los valores observados, el pH disminuye progresivamente desde el día 0, neutro (pH = 7.03) hasta el día 4 (pH = 4.81) luego se incrementa hasta el día 6 (pH = 5.24) y que él % de acidez se incrementa progresivamente desde el día 0, (% Acidez = 0.56) hasta el día 4 (% Acidez = 2.69) luego disminuye hasta el día 6 (% Acidez = 2.29)



*Figura 6.*  $\Delta$  de los valores de pH, % de acidez respecto a la fermentación (días)

En la *Tabla 8*, se observa los valores del análisis de imágenes hiperespectrales del proceso de fermentación de granos enteros y partidos de cacao, así como también de los valores de pH, obtenido de la *Tabla 1 y 3*. Según el modelo PLSR (Regresión de mínimos cuadrados parciales).

Tabla 8

*Resultado pronosticado del análisis realizado para pH, espectro puro y espectro con diversos tratamientos del modelo PLSR.*

Pre-tratamiento	Calibración		Cross Validación		Predicción	
	R <sup>2</sup>	RMSEC	R <sup>2</sup>	RMSEVC	R <sup>2</sup>	RMSEP
Espectro puro	0.54	0.35	0.35	0.42	0.50	0.37
SNV	0.49	0.37	0.36	0.42	0.40	0.41
Smoothing	0.56	0.35	0.48	0.40	0.50	0.38
1 <sup>era</sup> derivada	0.85	0.20	0.69	0.28	0.78	0.25
2 <sup>da</sup> derivada	0.84	0.21	0.69	0.31	0.74	0.27
MSC	0.45	0.39	0.37	0.43	0.43	0.40

RMSEC: Errores cuadráticos medios de calibración

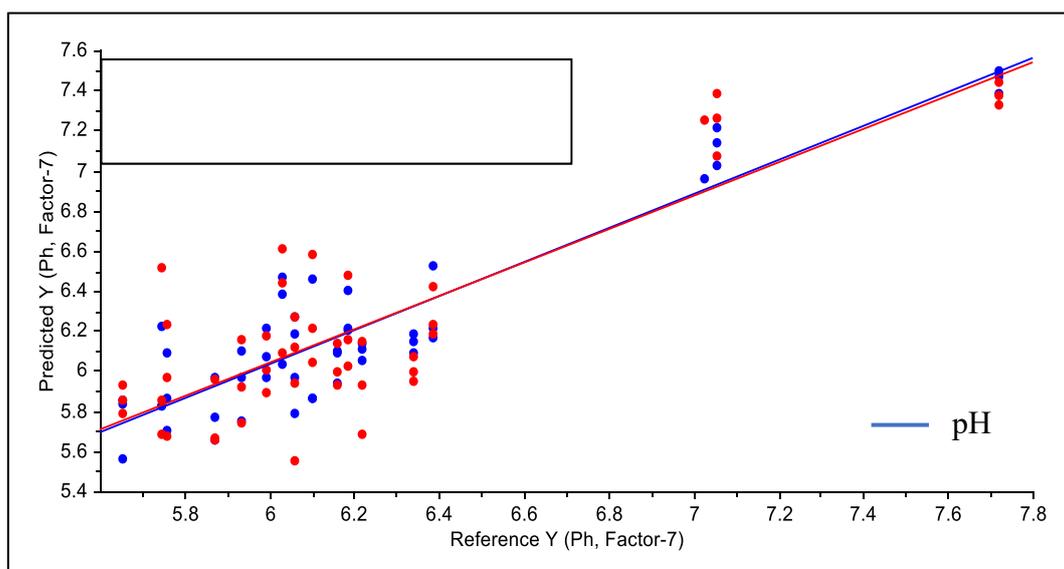
RMSEVC: Errores cuadráticos medios de validación cruzada

RMSEP: Error cuadrático medio de predicción

SNV: Variante normal estándar

MSC: Corrección de dispersión multiplicativa

En la tabla 8 se observa que los mejores resultados adquiridos por PLSR. Para pH se obtiene con pre-tratamiento de 1<sup>era</sup> derivada, con R<sup>2</sup> = 0.85, RMSEC = 0.20 de calibración, R<sup>2</sup> = 0.69, RMSEVC = 0.28 de validación cruzada y R<sup>2</sup> = 0.78, RMSEP = 0.25, contrastado con la *Figura 7*, en donde se observa la comparación de los valores pronosticados de los tratamientos de muestras de cacao frente a los valores medidos de pH, observándose un comportamiento lineal, similar para ambos casos.



*Figura 7. Valores pronosticados frente a medidos de pH de cacao.*

En la Tabla 9, se muestra los valores obtenidos del análisis de imágenes hiperespectrales de los granos enteros y partidos, así como también los valores de % de acidez, obtenido de la Tabla 1 y 3. Según el modelo PLSR (Regresión de mínimos cuadrados parciales).

Tabla 9

*Resultado pronosticado del análisis realizado para % de acidez, espectro puro y espectro con diversos tratamientos de modelos PLSR.*

Pre-tratamiento	Calibración		Cross Validación		Predicción	
	R <sup>2</sup>	RMSEC	R <sup>2</sup>	RMSEVC	R <sup>2</sup>	RMSEP
Espectro puro	0.70	0.48	0.52	0.62	0.55	0.60
SNV	0.63	0.53	0.49	0.64	0.49	0.61
Smoothing	0.57	0.58	0.38	0.71	0.55	0.59
1 <sup>era</sup> derivada	0.51	0.61	0.42	0.68	0.53	0.61
2 <sup>da</sup> derivada	0.89	0.30	0.73	0.45	0.63	0.55
MSC	0.49	0.63	0.33	0.71	0.52	0.62

RMSEC: Errores cuadráticos medios de calibración

RMSEVC: Errores cuadráticos medios de validación cruzada

RMSEP: Error cuadrático medio de predicción

SNV: Variante normal estándar

MSC: Corrección de dispersión multiplicativa

En la tabla 9 se observa que los mejores resultados adquiridos por PLSR. Para % de acidez se obtiene con pre-tratamiento de 2<sup>da</sup> derivada, con R<sup>2</sup> = 0.89, RMSEC = 0.30 de calibración, R<sup>2</sup> = 0.73, RMSEVC = 0.45 de validación cruzada y R<sup>2</sup> = 0.63, RMSEP = 0.55, contrastado con la Figura 8, en la cual se observa la comparación de los valores pronosticados de los tratamientos de muestras de cacao frente a los valores medidos de % de acidez, observando un comportamiento lineal, similar para ambos casos.

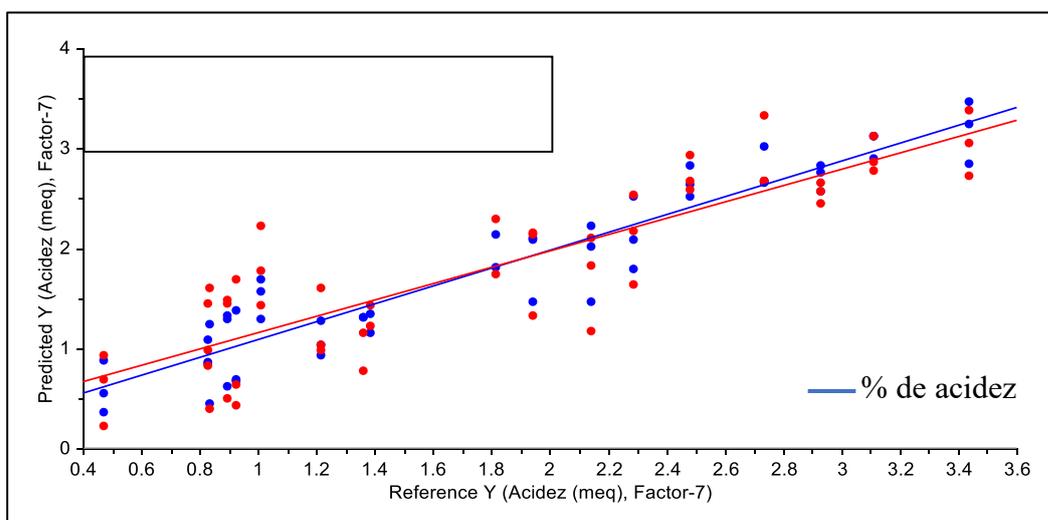
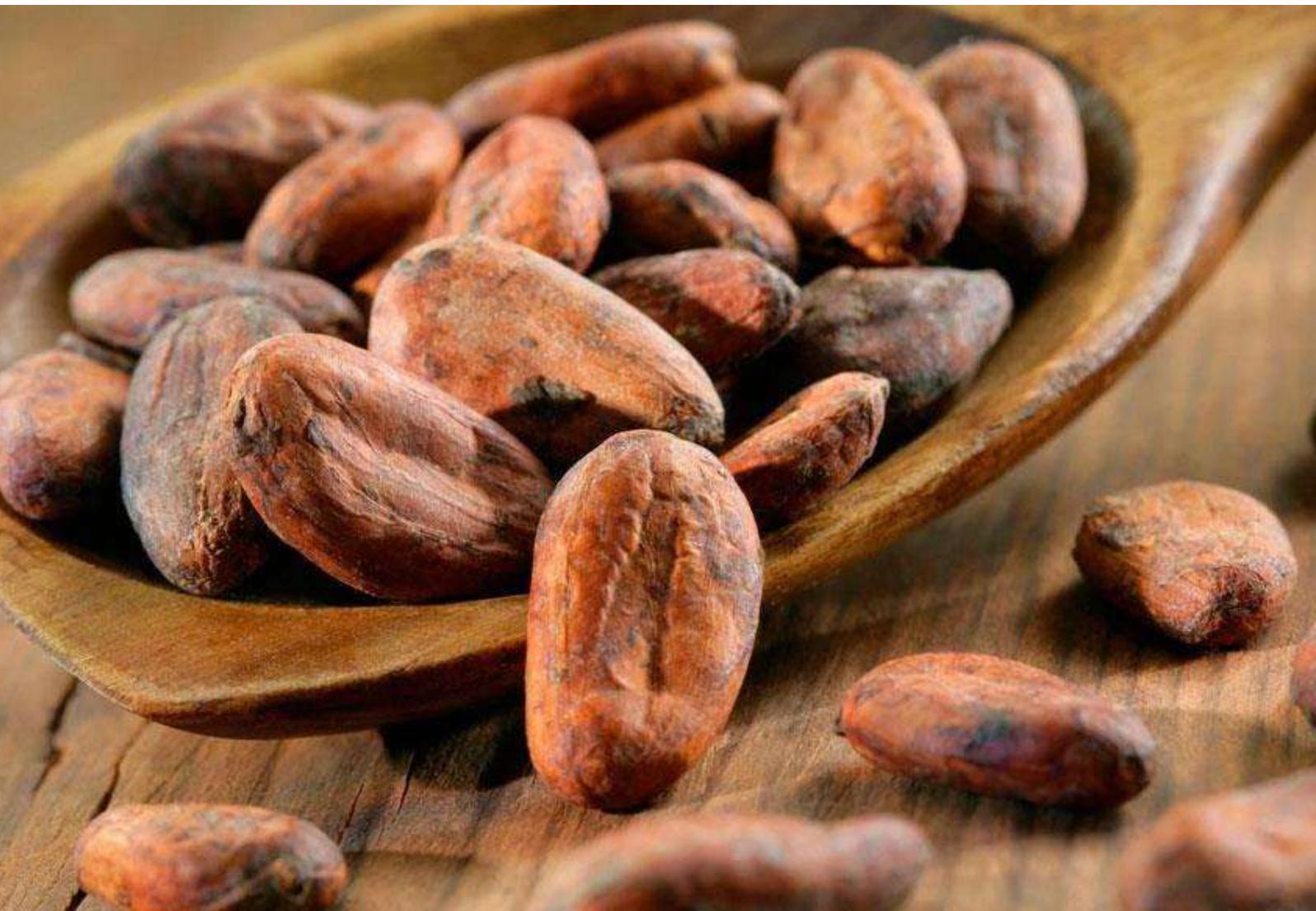


Figura 8. Valores pronosticados frente a medidos de % de acidez de cacao.

## IV. DISCUSIÓN



Es importante discutir aspectos de mucha trascendencia respecto al proceso de optimización de la fermentación del cacao, relacionados con el diseño experimental utilizado en la investigación. En primer lugar, en el diseño de Box-Behnken implementado es posible distinguir los parámetros óptimos que influyen en la optimización de la fermentación. Por lo tanto, para los cálculos de optimización habría parámetros fisicoquímicos determinantes para una adecuada fermentación como pH y % de acidez. Además, como la estimación se realizó con tres variedades de cacao, el análisis de varianza para la optimización de pH y % de acidez expresa que la variedad de cacao tiene un efecto significativo en la fermentación; Por otro lado, la frecuencia de remoción y los días de fermentación del cacao no tiene efecto significativo en el pH y % de acidez. Entonces en la investigación se determinó que para lograr una adecuada fermentación y obtener granos de cacao de calidad se debe de trabajar con la variedad de cacao CCN-51-Amarillo, con una remoción cada 24 horas, fermentado por 6 días con valores de  $\text{pH} = 5.42878$  y  $\% \text{ de acidez} = 2.19196$  obtenidos al concluir dicho proceso, Además Álvarez *et al.* (2010), obtuvo el mayor grado de fermentación de cacao comercial en cajones de madera, con una frecuencia de remoción cada 24 horas, fermentado por 5 días, con intervalos de pH de 5,20 – 5,49, mientras, Vite (2018) determino que para una adecuada fermentación los valores de pH deben ser de 5.1-5.7, valores inferiores indican presencia de ácidos no volátiles indeseables que dan al chocolate aromas desagradables, Senanayake *et al.* (1996) comparo cuatro intervalos de mezcla (6, 12, 18 y 24 h) con referencia especial a tres variedades de cacao seleccionadas, los granos de cacao se fermentaron durante 6 días utilizando caja de madera, los intervalos de mezcla fueron significativamente diferentes con las variaciones de temperatura y el grado de fermentación, la mezcla frecuente (a las 6 y 12 h) produjo un mayor número de frijoles bien fermentados que otros tratamientos, Utami *et al.* (2015), determino que el tiempo requerido para la fermentación de granos de cacao criollo es de 2-3 días, mientras que para el cacao forastero es de 6-8 días, lo que concuerda con Ortiz de Bertorelli *et al.* (2009), que el

cacao forastero tarda más tiempo en fermentar que el criollo, cuya diferencia de tiempo se ve relacionado directamente al tipo de cacao, Romero *et al.* (2013) explica que los granos de cacao fermentados tradicionalmente dentro de cajas de madera, muestreada cada 24 horas, se observó a las 72 h que, en todas las partes de frijol analizados mediante los valores de pH, la absorción espectral, hidrólisis de proteínas y de clase vicilina globulinas de granos resultaron bien fermentados. Abdul Samah *et al.* (1993), explica que durante los 6 días de la fermentación el pH de los granos aumentado notablemente en el quinto y sexto día de la fermentación, alcanzando un máximo de 5,35, al final de 6 días de fermentación). Los tamaños de las poblaciones de bacterias parecían correlacionarse directamente con los niveles de ácidos acético y láctico. García (2018) mencionó que durante el tiempo de la fermentación del cacao el pH varía, al inicio los cotiledones registra pH casi neutro, disminuyendo debido a la fusión de los ácidos de la pulpa 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 y concentraciones de ácido láctico (0,7 g ác. Láctico/100g), cuya contribución a la disminución del pH es mínima. El tiempo de fermentación tiene un efecto significativo ( $\alpha = 0,05$ ) sobre el pH de los granos, el valor de pH disminuye progresivamente hasta el cuarto día de fermentación, para luego mantenerse constante y en el último día se verifica un pequeño incremento debido a la formación de gradientes de acidez en la estructura del grano. La superficie del grano pierde acidez por evaporación debido a las altas temperaturas de fermentación, mientras que el centro se mantiene invariable, también evaluó la variación de la acidez total de las almendras de cacao, en la cual determino que la acidez se incrementa en los cuatro primeros días de fermentación y luego disminuye, Con respecto a este descenso 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, durante la fermentación aeróbica se forma el ácido acético que llega a una

concentración de 1,9 g ác. Acético/100g al concluir la fermentación, donde los valores de acidez son de 2,04 y 2,33 % ác. Acético para CCN-51 e ICS-6 respectivamente. Entonces el aporte de la investigación a diferencia de otras investigaciones es que para obtener granos de calidad se requiere un control exhaustivo de la fermentación, es recomendable clasificar los cajones de fermentación por variedad de cacao y realizar la remoción después de las 48 horas de iniciado la fermentación a fin de que se active y desarrollen los microorganismos, posterior a ello se debe realizar la remoción cada 24 horas con la finalidad de homogenizar la fermentación y tener mejores rendimientos, también es recomendable fermentar en promedio por 6 días con la finalidad de obtener mayor % de grano fermentados esto con las variedades de cacao forastero mientras para el cacao nativo se recomienda realizar la fermentación por menos tiempo ello depende de la cantidad a fermentar.

Concluida el proceso de fermentación mediante la optimización de las variables y el análisis fisicoquímico, el reto es establecer una propuesta para el control de calidad del proceso de fermentación empleado tecnología al alcance del productor rural como es el celular ya que la mayor parte de las personas cuenta con dicho dispositivo es por ello que se evaluó la calidad de los granos durante la fermentación mediante visión computacional de los resultados obtenidos se observa que los granos de cacao CCN-51-Amarillo cambian de color durante la fermentación, para granos enteros el cambio de  $L^*a^*b^*$  tiene una función lineal, para  $\Delta L^*$  (97.85-87.14) de blanco a negro,  $\Delta a^*$ (0.65-9.89) de verde a rojo,  $\Delta b^*$ (7.88-41.39) de azul a verde y para granos partidos el valor de  $Lm^*am^*bm^*$  tiene una función lineal, para  $\Delta Lm^*$ (92.06-96.71) de negro a blanco,  $\Delta am^*$ (5.49-3.07) de roja a verde,  $\Delta bm^*$  (22.56-5.72) de amarillo a azul, trabajos desarrollado por García (2018) determinó que el cambio de color de los granos de cacao durante la fermentación de un color claro a un oscurecimiento, disminución de la luminosidad ( $L^*$ ), 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 (Ortiz et al. 2009).

La variación de la coordenada  $a^*$ , Enmanuel *et al.* (2012), menciona que el descenso del valor de  $a^*$  se debe a la hidrólisis de las antocianinas que imparten el color púrpura de las almendras de cacao. Garzón (2008) menciona que el cambio de color se debe al enrojecimiento de las antocianinas que sufren un cambio estructural en condiciones ácidas (Cation flavilio AH), teniendo como consecuencia un viraje de púrpura (pH cercano al neutro) al color rojo (pH ácido).

En cuanto a la variación de  $b^*$ , color amarillo (+) y azul (-), se debe al pardeamiento como consecuencia de la presencia de polifenoles oxidados por acción de la enzima polifenol oxidasa predominando del color amarillo sobre el azul. (Enmanuel *et al.* 2012)

Los valores de  $L^*a^*b^*$  y  $Lm^*am^*bm^*$  varían según las investigaciones realizadas por los diferentes autores esta variación se debe a la variedad de cacao, método de fermentación, sistema de reporte de imagen empleado, tiempo de exposición de la muestra previo al análisis, entre otros, existiendo similitud entre todos en la función lineal del cambio de color del cacao en la fermentación, y que dichos valores obtenidos servirán para establecer un patrón de datos que servirán para diseñar un aplicativo en el celular para la identificación del grado de fermentación de los granos de cacao mediante imágenes digitales y por ende poder sustituir a la prueba de corte convencional.

Paralelo al análisis de visión computacional se realizó el análisis mediante imágenes hiperespectrales del proceso de fermentación del cacao con la finalidad de otorgan un alto nivel de exactitud espectral y radiométrica a la imagen de las muestras y sea especialmente útil para determinar la calidad del grado de fermentación de los granos de cacao, según el modelo PLSR (Regresión de mínimos cuadrados parciales) para pH se obtiene con pre-tratamiento de 1era derivada, con  $R^2 = 0.85$ , RMSEC =0.20 de calibración,  $R^2 = 0.69$ , RMSEVC = 0.28 de

validación cruzada y  $R^2 = 0.78$ ,  $RMSEP = 0.25$ , y para % de acidez se obtiene con pre-tratamiento de 2da derivada, con  $R^2 = 0.89$ ,  $RMSEC = 0.30$  de calibración,  $R^2 = 0.73$ ,  $RMSEVC = 0.45$  de validación cruzada y  $R^2 = 0.63$ ,  $RMSEP = 0.55$ ., trabajos similares realizado por Chen *et al.* (2015), con la finalidad de demostrar la capacidad de las imágenes hiperespectrales para predecir los cambios en el contenido de antocianinas en las uvas para vino durante la maduración; el mejor modelo obtuvo usando regresión de mínimos cuadrados parciales (PLSR), produciendo un coeficiente de validación (P-R2) de 0.9414 y un error cuadrático medio de predicción (RMSEP) de 0.0046, más alto que el modelo PLSR, que tenía un P-R2 de 0.8407 y un RMSEP de 0.0129.

# **V.CONCLUSIONES**



En la investigación se evaluó el efecto de la variedad, frecuencia de remoción y tiempo de fermentación en el rendimiento y calidad de granos de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante visión computacional e imágenes hiperespectrales, con resultados satisfactorios en la calidad de granos fermentados, método que podría sustituir a la prueba de corte convencional.

Los valores óptimos de las variables independientes son: variedad de cacao CCN-51-Amarillo, con una frecuencia de remoción cada 24 horas, fermentado por 6 días, y variable respuesta pH 5.244, % de acidez 2.292 y los valores de visión computacional para grano entero  $L^* = 87.1358$ ,  $a^* = 9.8923$  y  $b^* = 41.3938$  y para granos partidos  $Lm^* = 96.7053$ ,  $am^* = 3.0744$  y  $bm^* = 5.7240$ .

Los resultados del análisis de visión computacional de los valores optimizados varían linealmente durante la fermentación para granos enteros de cacao:  $\Delta L^*$  de blanco a negro,  $\Delta a^*$  de verde a rojo,  $\Delta b^*$  de azul a verde y para granos partidos de cacao:  $\Delta Lm^*$  de negro a blanco,  $\Delta am^*$  de roja a verde,  $\Delta bm^*$  de amarillo a azul.

Los resultados de la variable respuesta pH y % de acidez varían con una tendencia polinómica durante la fermentación,  $\Delta$  pH disminuye y  $\Delta$  % de acidez se incrementa ambos son inversamente proporcionales.

Los resultados del análisis de imágenes hiperespectrales del proceso de fermentación del cacao según el modelo PLSR (Regresión de mínimos cuadrados parciales) para pH se obtiene con pre-tratamiento de 1era derivada, con  $R^2 = 0.85$ ,  $RMSEC = 0.20$  de calibración,  $R^2 = 0.69$ ,  $RMSEVC = 0.28$  de validación cruzada y  $R^2 = 0.78$ ,  $RMSEP = 0.25$ , y para % de acidez se obtiene con pre-tratamiento de 2da derivada, con  $R^2 = 0.89$ ,  $RMSEC = 0.30$  de calibración,  $R^2 = 0.73$ ,  $RMSEVC = 0.45$  de validación cruzada y  $R^2 = 0.63$ ,  $RMSEP = 0.55$ .

# VI. PROPUESTA



La producción de cacao amigable con el medio ambiente en el Perú, es uno de los mejores en el mundo, considerado producto bandera que se cultiva en la amazonia con características organolépticas únicas demandada por el mercado nacional e internacional, siendo una de las actividades primarias generadora de ingresos económicos en las familias incluyendo la participación de los jóvenes y mujeres en la cadena productiva, hoy en día la alta demanda ha permitido mejorar e incrementar la producción de manera sustentable, es Por ello, el Salón del Cacao y Chocolate se ha convertido en uno de los eventos más importantes del país para la promoción del consumo y la producción sostenible de este recurso. (PNUD, 2018)

El presente trabajo de investigación ha permitido obtener los parámetros adecuados de una correcta fermentación y control de calidad empleando inteligencia artificial para obtener un buen cacao para su transformación y comercialización.

El cacao es una materia prima que por sus propiedades funcionales y nutricionales como alto contenido de vitaminas, fibras y minerales es empleada en la industria para la elaboración de una gama de productos, que se comercializan en los mercados.

La mayor producción del cacao se concentra en países africanos y asiáticos, siendo a un insuficiente para cubrir la demanda insatisfecha, generando en el Perú amplias posibilidades para incrementar la producción ya que la tendencia de los precios en los próximos años será creciente ante la poca producción de dicho producto deseable por sus características organolépticas únicas

Según el Convenio Internacional del Cacao 2010 de la ICCO, El Perú está clasificado como el segundo país productor y exportador de cacao fino de aroma después de Ecuador. Es por este motivo que, desde hace algunos años, empresas chocolateras de todo el mundo visitan el país con el fin de cerrar contratos directamente con los productores de cacao, permitiendo al

agricultor tomar conciencia en aplicar las buenas prácticas agrícolas y manufactureras en toda la cadena de valor, y ofrecer un producto de calidad.

Según el Ministerio de Agricultura y Riego del Perú (MINAGRI, 2014), alrededor del 44% de la producción corresponde a cacao fino (Criollo + Nativo) y el 56% de la producción es cacao corriente o común (CCN-51 + Forastero).

Un aspecto que ha aumentado la visibilidad del producto peruano en el extranjero es el interés por variedades de cacao nativas; así como el incremento de los alimentos gourmet del Perú y la renovación del sector como parte de la estrategia de promover el país, ampliamente reconocido por su biodiversidad. (Romero, 2016)

Debido a la contaminación ambiental por el uso de equipos y materiales inadecuados y por las malas prácticas de manufactura en el proceso de fermentación de cacao, es necesario recurrir a utilizar equipos que estén al alcance de los productores de cacao sobre todo aquellos que se encuentran en zonas rurales muy alejadas, pero por motivo de comunicación cuentan con un celular básico con acceso a cámara, es por ello que se establece una propuesta de desarrollar una aplicación que se pueda instalar en los dispositivos móviles de los productores y que mediante ello se pueda tomar las fotos del proceso de fermentación sin tener contacto directo con el proceso y que esas imágenes puedan ser procesadas en el celular y se determina el estado de fermentación que se encuentra en función a los resultados obtenidos en la investigación, permitiendo un control más eficiente que garantice la calidad del cacao para su transformación y comercialización.

Para implementar la propuesta de diseñar un aplicativo móvil de control de calidad de fermentación de cacao, se formula los siguientes objetivos:

### **6.1. Objetivo general**

Diseñar un aplicativo móvil de control de calidad de fermentación de cacao mediante imágenes tomadas por dispositivos móvil (celular) empleando los parámetros de

fermentación: variedad de cacao CCN-51-Amarillo, frecuencia de remoción cada 24 horas, fermentado por 6 días, con valores de pH 5.244, % de acidez 2.292 y de visión computacional para grano entero  $L^* = 87.1358$ ,  $a^* = 9.8923$  y  $b^* = 41.3938$  y para granos partidos  $Lm^* = 96.7053$ ,  $am^* = 3.0744$  y  $bm^* = 5.7240$ .

## 6.2. Objetivos específicos

- ❖ Incentivar a los agricultores a cultivar cacao de la variedad CCN-51 por su alto rendimiento en grano, aprovechando la potencialidad agroclimática de la zona nororiental.
- ❖ Realizar una adecuada fermentación del cacao con la finalidad de obtener cacao de buena calidad con los atributos que demanda el mercado internacional, aprovechando las ventajas de los nichos de mercados especiales.
- ❖ Emplear las ecuaciones de pH, % de acidez, visión computacional e imágenes hiperspectrales obtenidas del trabajo de investigación para determinar una adecuada fermentación del cacao, para obtener un producto de calidad para su transformación.
- ❖ Emplear el dispositivo móvil (celular) para la toma de imágenes para determinar la calidad del proceso de fermentación del cacao ya que es un medio que no tiene contacto directo y no contamina el producto.

## 6.3. Programa sustentable de la producción de cacao

En la exportación del cacao la calidad es de vital importancia para la sostenibilidad y competitividad en los mercados, exigentes por un producto orgánico y que cumpla con los estándares internacionales de inocuidad y seguridad alimentaria.

En la cadena de valor del cacao todas las actividades que se realizan para obtener el chocolate se ve influenciada en el sabor y la calidad, que va desde la genética de los

granos, buenas prácticas agrícolas, cosecha, pos cosecha, fermentación y secado y el valor agregado que se realiza en la industria como el tostado, molido y conchado, etc.

Uno de los objetivos de la producción de cacao amigable con el medio ambiente es producir cacao con aromas y sabores potenciales que lo hacen único, para lo cual el sistema de trazabilidad debe estar enfocado en la adecuada fermentación y secado de los granos de cacao de óptima calidad para la exportación y las condiciones donde lo realizan debe cumplir con los estándares de calidad que el mercado lo requiere.

Para potencializar la calidad del cacao en cuanto sabores aroma y rendimiento es importante cumplir con las buenas prácticas agrícolas y de manufactura permanentemente ya que esto conlleva a la obtención de productos y subproductos competitivos en el mercado, el fomento del fortalecimiento de capacidades a los cacaoteros permite dinamizar la producción adaptando tecnologías que sean sostenibles con el medio ambiente, requisito indispensable en la producción orgánica del cacao cuya denominación es el valor para la comercialización que hoy muchos nichos de mercados pagan buenos precios por estas características diferenciadoras. (MINAGRI, 2014)

Es por ello que se debe promover un programa sustentable de producción y transformación de cacao en la provincia de Jaén, región Cajamarca con la finalidad de que los productores produzcan los granos de una manera amigable con el medio ambiente, empleado las buenas prácticas agrícolas, controlando de los parámetros adecuados para una correcta fermentación y secado, ya que la producción de cacao es una actividad de gran importancia de esta provincia que a un no se ve reflejado en la mejoras de precios en la comercialización.

#### **6.4. Programa de monitoreo y control de calidad de la producción de cacao**

Se debe incentivar el adecuado uso de la tecnología (celular) para el control de calidad de fermentación del cacao mediante un aplicativo móvil, que con los resultados de

la investigación se cree un algoritmo que permita codificar y dar lectura de acuerdo al color y cambios estructurales de los granos reportado en una imagen (toma fotográfica) se pueda descifrar el estado de fermentación y la calidad de la misma, reduciendo de esta manera el gasto en equipos que demandan de todo un sistema, consumo de energía y tiempo en el análisis del proceso de fermentación, por lo cual el celular se convertiría en un dispositivo al alcance de todo los productores para poder realizar el análisis de la calidad y obtener un buen cacao para su procesamiento y comercialización, permitiendo el incremento de la economía familiar rural.

El uso de tecnologías como visión computacional e imágenes hiperespectrales en la actualidad es de mucha importancia para la agroindustria y su uso se está estandarizando en otras actividades, ya que es una análisis que no tiene contacto directo con el alimento, mucho menos contamina y de mucha precisión, es por ello que su demanda en los diferentes campos está siendo de mucha ayuda, por lo cual se recomienda emplear en la producción y transformación del cacao mediante un aplicativo móvil.

# **VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

- Abdul Samah, O., Ibrahim, N., Alimon, H., & Abdul Karim, M. (1993). Estudios de fermentación de granos de cacao almacenados. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 603-604. doi:DOI: 10.1007 / BF00386306ID de Corpus: 10701788
- Álvarez, C., Tovar, L., García, H., Morillo, F., Sánchez, P., Girón, C., & De Farias, A. (2010). Evaluación de la calidad comercial del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) usando dos tipos de. *Revista Científica UDO Agrícola*, 10(1), 76-87. Obtenido de <http://www.bioline.org.br/pdf?cg10010>
- Barbin, D.F., Oliveira M. M., Cerqueira B. V., Sylvio B.Jr. 2021. Classification of fermented cocoa beans (cut test) using computer vision. *J. Food Composition and Analysis*. 97 (2021) 103771. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2020.103771>.
- Beg, M.S., Ahmad, S., Jan, K., Bashir, K., 2017. Status, supply chain and processing of cocoa- A review. *Trends Food Sci. Technol.* 66, 108–116.
- Castro-Alayo, E.M., Idrogo-V´asquez, G., Siche, R., Cardenas-Toro, F.P., (2019). Formation of aromatic compounds precursors during fermentation of Criollo and Forastero cocoa. *Heliyon* 5 (1), e01157. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01157>.
- Chen, S., Zhang, F., Ning, J., Liu, X., Zhang, Z., & Yang, S. (2015). Predicting the anthocyanin content of wine grapes by NIR hyperspectral imaging. *Food Chemistry*, 788–793. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.119>
- Enmanuel, O., Jennifer, Q., Agnes, S., Jemmy, S., & Firibu, K. (2012). Influence of pulp-preconditioning and fermentation on fermentative quality and appearance of Ghanaian cocoa (*Theobroma cacao*) beans. *International Food Research Journal*, 19(1), 127-133. Obtenido de: <https://search.proquest.com/openview/2498bc202a742edb3e9421babdf1f2a2/1?pq-origsite=gscholar&cbl=816390>

- García, J. C. (2018). *Correlación de la porosidad con el grado de fermentación del grano de cacao peruano (Theobroma cacao L.)*. Lima-Perú.
- Garzón, G. (2008). Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos. *Acta Biológica Colombiana*, 13(3), 27-36. Obtenido de:  
<https://www.redalyc.org/pdf/3190/319028004002.pdf>
- Geographic, N. (2020). *Cacao piurano es considerado mejor del mundo*. Lima-Perú. Obtenido de: <https://larepublica.pe/sociedad/2020/01/05/cacao-piurano-es-considerado-mejor-del-mundo-de-acuerdo-a-national-geographic-mdga/>
- Guillín, E., y Lara, M. (2010). Efecto de los sistemas de fermentación en la calidad del cacao de la variedad complejo nacional x trinitario (*Theobroma cacao L.*) del Cantón Las Naves, Provincia Bolívar. Tesis Título Ingeniero, Universidad Estatal de Bolívar. Ecuador. Disponible en:  
<http://www.dspace.ueb.edu.ec/bitstream/123456789/902/1/043.pdf>.
- Gutiérrez, H y De la Vara, R. 2008. Análisis y diseño de experimentos. McGraw Hill. Mexico. 545p.
- Kongor, J.E., Takrama, J.F., Budu, A.S., Mensah-Brown, H., Afoakwa, E.O., (2013). Effects of fermentation and drying on the fermentation index and cut test of pulp pre-conditioned ghanaiian cocoa (*Theobroma cacao*) beans. *J. Food Sci. Eng.* 3, 625–634.
- Kongor, J.E., Hinneh, M., de Walle, D.Van, Afoakwa, E.O., Boeckx, P., Dewettinck, K., (2016). Factors influencing quality variation in cocoa (*Theobroma cacao*) bean flavour profile a review. *Food Res. Int.* 82, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.01.012>.
- Kumari, N., Grimbs, A., D'Souza, R.N., Verma, S.K., Corno, M., Kuhnert, N., Ullrich, M.S., (2018). Origin and varietal based proteomic and peptidomic fingerprinting of

- Theobroma cacao in non-fermented and fermented cocoa beans. *Food Res. Int.* 111, 137–147. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.05.010>.
- Mathanker, S.K., Weckler, P.R., Bowser, T.J., Wang, N., Maness, N.O., 2011. AdaBoost classifiers for pecan defect classification. *Comput. Electron. Agric.* 77, 60–68.
- Méndez, I. 2007. Metodología de Superficie de Respuesta. Universidad Autónoma de México. 367p.
- MINAGRI (Ministerio de Agricultura y Riego, P. (2012). Catálogo de cultivares de cacao del Perú.
- MINAGRI. (2014). *Catálogo de Cultivares de Cacao del Perú*. Ministerio de Agricultura y Riego, Lima-Perú.
- Moreira, I.M., da, V., Vilela, L., de, F., Santos, C., Lima, N., Schwan, R.F., (2018). Volatile compounds and protein profiles analyses of fermented cocoa beans and chocolates from different hybrids cultivated in Brazil. *Food Res. Int.* 109, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.012>.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (Segunda ed.). Mexico: Limusa Wiley.
- Nolasco-Perez, I.M., Rocco, L.A.C.M., Cruz-Tirado, J.P., Pollonio, M.A.R., Barbon, S., Barbon, A.P.A.C., Barbin, D.F., 2019. Comparison of rapid techniques for classification of ground meat. *Biosyst. Eng.* 183, 151–159.
- Ortiz de Bertorelli, L., Rovedas L, G., & Graziani de Fariñas, L. (2009). Influencia de varios factores sobre índices físicos del grano de cacao en fermentación. *Agronomía Tropical*, 59(1), 81-88. Obtenido de: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0002-192X2009000100008](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0002-192X2009000100008)

- Pereira, L.F.S., Barbon Jr., S., Valous, N.A., Barbin, D.F., 2018. Predicting the ripening of papaya fruit with digital imaging and random forests. *Comput. Electron. Agric.* 145, 76–82.
- PNUD. (2018). *Un buen chocolate es sostenible*. Lima-Perú. Obtenido de: <https://www.pe.undp.org/content/peru/es/home/presscenter/articles/un-buen-chocolate-es-sostenible-.html>
- Reyes, J. M. (2016). *Estudio de la visión hiperespectral en el proceso de fermentación del cacao*. Piura. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/2513>
- Romero Cortes, T., Salgado Cervantes, M., García Alamilla, P., García Alvarado, M., Rodríguez Jiménez, G., Hidalgo Morales, M., & Robles Olvera, V. (2013). Relationship between fermentation index and other biochemical changes evaluated during the fermentation of Mexican cocoa (*Theobroma cacao*) beans. *Science of Food and Agriculture*, 93(10), 2596-604. doi:<https://doi.org/10.1002/jsfa.6088>
- Romero, C. A. (2016). *Estudio del Cacao en el Perú y el Mundo Situación Actual y Perspectivas en el Mercado*. MINAGRI-DGPA-DEEIA, Lima-Perú. Obtenido de [www.minagri.gob.pe](http://www.minagri.gob.pe)
- Saldaña, E., Siche, R., Castro, W., Huamán, R., & Quevedo, R. (2014). Measurement parameter of color on yacon (*Smallanthus sonchifolius*) slices using a computer vision system. *LWT - Food Science and Technology*, 1220-1226. doi:<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.037>
- Saldaña, E., Siche, R., Huamán, R., Luján, M., Castro, W., & Quevedo, R. (2013). Computer vision system in real-time for color determination on flat surface food. *Scientia Agropecuaria*, 55 - 63. Obtenido de [www.sci-agropecu.unitru.edu.pe](http://www.sci-agropecu.unitru.edu.pe)
- Senanayake, M., R Jansz, E., & A Buckle, K. (1996). Effect of Different Mixing Intervals on the Fermentation of Cocoa Beans. *Science of Food and Agriculture*, 42È48.

doi:[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199705\)74:1%3C42::AID-JSFA768%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199705)74:1%3C42::AID-JSFA768%3E3.0.CO;2-U)

- Somarriba, E. (2012). *Proyecto Cacao Centroamérica, CATIE. Calidad de Cacao en Centroamérica: Un vistazo a la situación en 2009*. Serie Reuniones Técnicas N° 17., CATIE, Costa Rica.
- Szczypinski, P.M., Zapotoczny, P., (2012). Computer vision algorithm for barley kernel identification, orientation estimation and surface structure assessment. *Comput. Electron. Agric.* 87, 32–38.
- Utami Hatmi, R., Kobarsih, M., & Cahyaningrum, N. (2015). Fungi Level Analysis of Cocoa Beans Based on Fermentation Box Type and Duration. *Procedia Food Science ScienceDirect*, 3, 371 – 382. doi:10.1016/j.profoo.2015.01.041
- Vidarte, G. M. (2016). Análisis de la calidad del grano de cacao mediante imágenes hiperespectrales usando técnicas de visión artificial. Piura. Obtenido de <https://pirhua.udep.edu.pe/>
- Vite, J. U. (2018). Evaluación de las características del licor de cacao CCN-51 (*Theobroma cacao L.*) considerando diferentes aspectos de manejo en poscosecha. trabajo de titulación, Santo Domingo.

## ANEXO 1

Secuencia de figuras para determinar el rendimiento del cacao (*Theobroma cacao* L.)



Figura 9. Variedad de cacao CCN-51-Rojo, CCN-51-Amarillo y Nacional



Figura 10. Pesado de las mazorcas de cacao



Figura 11. Pesado de los granos de cacao



Figura 12. Analizador automático de humedad A&D ML-51

## ANEXO 2

### Proceso de fermentación del cacao



*Figura 13.* Acondicionamiento de los 15 cajones de fermentación



*Figura 14.* Muestras de granos de cacao a dos días de fermentación

## ANEXO 3

### Análisis de visión computacional de granos de cacao



Figura 15. Muestras de granos partidos de cacao fermentado



Figura 16. Equipo de visión computacional



Figura 17. Toma fotográfica de muestras de granos de cacao fermentado



Figura 18. Muestras de granos de cacao fresco y fermentado



Figura 19. Segmento de imagen para ser procesada en MATLAB

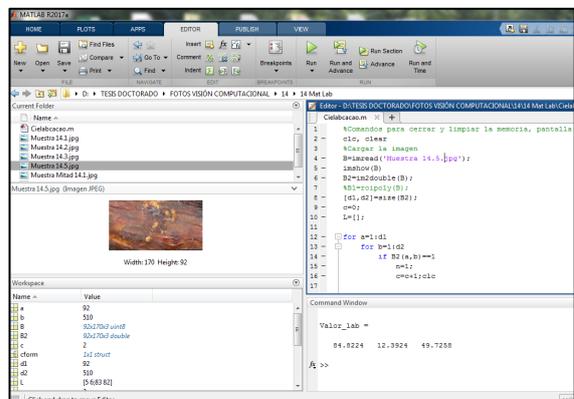


Figura 20. Valores de  $L^*a^*b^*$  obtenidos mediante MATLAB

## ANEXO 4

### Análisis de imágenes hiperespectrales de granos de cacao



Figura 21. Muestra de cacao fresco partido listo para toma de imagen

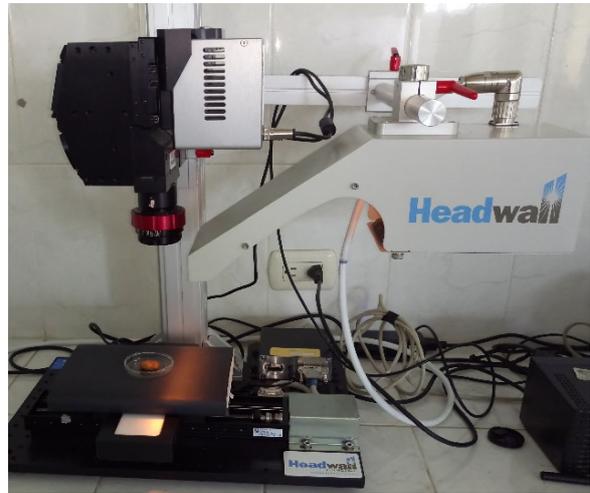


Figura 22. Equipo de imágenes hiperespectrales Headwall

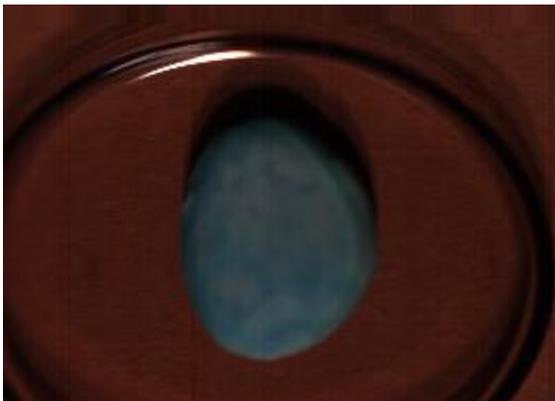


Figura 23. Toma de imagen hiperespectrales de granos de cacao entero



Figura 24. Toma de imagen hiperespectrales de granos de cacao partido

	A	B	C	D	E	F
13	CA CAO 12.2	0,803308849135218	0,796573921874995	0,791826306426887	0,787925876768868	0,7851264587
14	CA CAO 12.3	0,799062614400290	0,793379700483046	0,789082554794022	0,78549854629969	0,7835951426
15	CA CAO 12.4	0,82588196696236	0,817344227340219	0,81238992727145	0,80813187663793	0,8052501014
16	CA CAO 12.5	0,801986522685007	0,792780379310346	0,788089672413790	0,783437190817515	0,7811102958
17	CA CAO MITAD 12.1	0,76578933847331	0,756646959811646	0,751698401102519	0,747346615557763	0,7441775597
18	CA CAO MITAD 12.2	0,749531745662674	0,740200157002326	0,734202072884989	0,730028025404243	0,7268103029
19	CA CAO MITAD 12.3	0,752231449765521	0,742947063436329	0,737507436610490	0,732992138857681	0,7302079692
20	CA CAO MITAD 12.4	0,791958796812576	0,7821314486950	0,78089382134071	0,78413066252498	0,7815090657
21	CA CAO MITAD 12.5	0,802701282843529	0,794077978783554	0,789395779749757	0,785131368601878	0,7822207411
22	CA CAO 6.1	0,792087118635858	0,784815005505150	0,780144511378128	0,776279362923000	0,7735394983
23	CA CAO 6.2	0,766356809195404	0,758508308494971	0,753140495330460	0,748657049209770	0,7457811963
24	CA CAO 6.3	0,794582534520166	0,786992756731567	0,782112392294853	0,777805528789986	0,7747998310
25	CA CAO 6.4	0,74509389561493	0,73745469371747629	0,732388205888495	0,727945694929873	0,7253766126
26	CA CAO 6.5	0,799554009811417	0,792722061493371	0,788157379051988	0,784333679663608	0,7820593779
27	CA CAO MITAD 6.1	0,746111529639181	0,735457574764204	0,729949436554077	0,725102954046935	0,7222361866
28	CA CAO MITAD 6.2	0,771917102996189	0,762710293629366	0,757135720159421	0,75336512161512	0,7501099934
29	CA CAO MITAD 6.3	0,770955505095980	0,763712099109796	0,756198263335076	0,751881016207328	0,7489858337
30	CA CAO MITAD 6.4	0,743649473186226	0,733832856596287	0,728057167121769	0,72315360287472	0,7199535473
31	CA CAO MITAD 6.5	0,762891947198001	0,753220837596227	0,748028683436805	0,743419836733365	0,7400398134
32	CA CAO 8.1	0,777035036806534	0,769992956350319	0,765416993522951	0,761376676710783	0,7590583401
33	CA CAO 8.2	0,79765802128837	0,791198061183301	0,787696522504837	0,784367856759747	0,7821895980
34	CA CAO 8.3	0,79922193891864	0,793325800949365	0,789758624028032	0,785414918037978	0,7831462075
35	CA CAO 8.4	0,79682723927447	0,79142655958549	0,788129549649339	0,783886249117291	0,7820800977

Figura 25. Datos de los valores de imagen hiperespectrales de granos de cacao

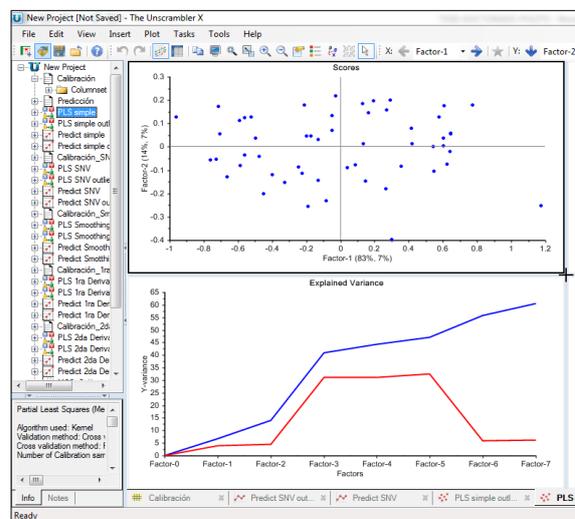


Figura 26. Graficas obtenidas del programa The Unscrambler

## ANEXO 5

### Análisis fisicoquímico de granos de cacao



Figura 27. Muestras de cacao trituradas en un mortero



Figura 28. Filtrado de líquido para medir pH y % de acidez

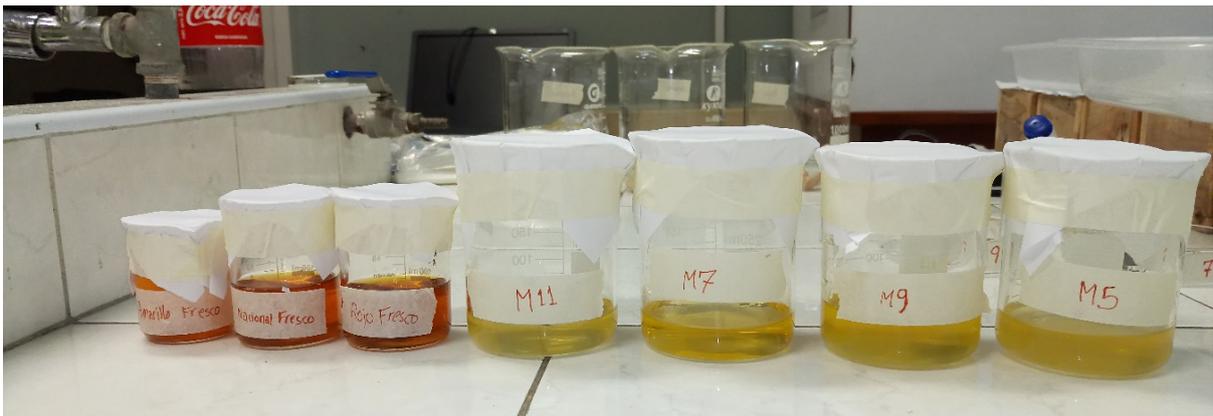


Figura 29. Muestra líquida de cacao fermentado de los 15 tratamientos

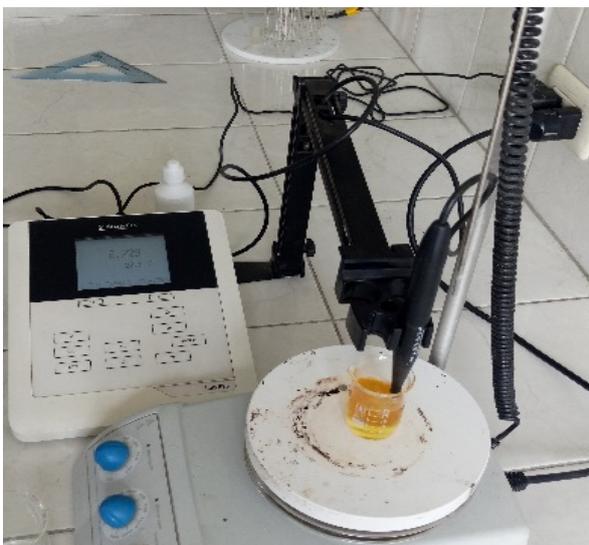


Figura 30. Medición del pH de muestras de cacao fresco y fermentado



Figura 31. Medición del % de acidez de muestras de cacao fresco y fermentado



 SCAN ME



**Tinta&Pluma**  
Editorial



OPEN  ACCESS