

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS**



T E S I S

**APLICACIÓN DE IMÁGENES ESPECTRALES DURANTE EL PROCESO DE
FERMENTACIÓN SUMERGIDA DE CAFÉ EN LA VARIEDAD CATIMOR**

Para optar por el Título Profesional de:

INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Presentado por la Bachiller:

XIMENA BECERRA BAZAN

Asesor:

Dr. JIMY FRANK OBLITAS CRUZ

CAJAMARCA – PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

1. Investigador:
Ximena Becerra Bazan
DNI: N° 77706316
Escuela Profesional/Unidad UNC:
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS
2. Asesor:
Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz
Facultad/Unidad UNC:
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación:
APLICACIÓN DE IMÁGENES ESPECTRALES DURANTE EL PROCESO DE FERMENTACIÓN SUMERGIDA DE CAFÉ EN LA VARIEDAD CATIMOR
6. Fecha de evaluación: 16/09/2025
7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (ORIGINAL) (*)
8. Porcentaje de Informe de Similitud: 9%
9. Código Documento: oid: 3117:499362363
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 16/09/2025

<i>Firma y/o Sello Emisor Constancia</i>
 <hr/> Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz DNI: 40043738

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2025



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
"NORTE DE LA UNIVERSIDAD PERUANA"
Fundada por Ley N° 14015, del 13 de febrero de 1962
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
Secretaría Académica



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En la ciudad de Cajamarca, a los veinticinco días del mes de agosto del año dos mil veinticinco, se reunieron en el ambiente **2H - 204** de la Facultad de Ciencias Agrarias, los miembros del Jurado, designados según **Resolución de Consejo de Facultad N° 527-2024-FCA-UNC, de fecha 16 de octubre del 2024**, con la finalidad de evaluar la sustentación de la **TESIS** titulada: **"APLICACIÓN DE IMÁGENES ESPECTRALES DURANTE EL PROCESO DE FERMENTACIÓN SUMERGIDA DE CAFÉ EN LA VARIEDAD CATIMOR"**, realizada por la Bachiller **XIMENA BECERRA BAZAN** para optar el Título Profesional de **INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**.

A las nueve horas y quince minutos, de acuerdo a lo establecido en el **Reglamento Interno para la Obtención de Título Profesional de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cajamarca**, el Presidente del Jurado dio por iniciado el Acto de Sustentación, luego de concluida la exposición, los miembros del Jurado procedieron a la formulación de preguntas y posterior deliberación. Acto seguido, el Presidente del Jurado anunció la aprobación por unanimidad, con el calificativo de diecisiete (17); por tanto, la Bachiller queda expedita para proceder con los trámites que conlleven a la obtención del Título Profesional de **INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**.

A las diez horas y quince minutos del mismo día, el Presidente del Jurado dio por concluido el Acto de Sustentación.

Ing. M. Sc. Fanny Lucila Rimarachin Chávez
PRESIDENTE

Ing. Mtr. Max Edwin Sangay Terrones
SECRETARIO

Dr. José Gerardo Salhuana Granados
VOCAL

Dr. Jimmy Frank Oblitas Cruz
ASESOR

DEDICATORIA

A MIS PADRES, FAMILIA Y PERSONAS QUE CONFÍARON EN MÍ.

Este gran paso que estoy realizando en mi vida profesional, está dedicado a mi madre y a mi padre, quiénes me enseñaron que en la vida hay que perseguir nuestros sueños, sin descansar hasta ver que lo hayamos cumplido; y que los principios y valores que nos dan en casa, por más que pasen los años, y los logros obtenidos, nunca olvidemos lo humildes, humanos y la vocación de servicio a los demás. También agradezco a mi familia, quién con su apoyo y unión, fueron las piezas fundamentales en el desarrollo de mi vida emocional y parte alentadora para seguir adelante con mis metas y proyectos de vida.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la vitalidad, que, con su grandioso amor, me dio la fortaleza y supo guiar cada uno de mis pasos para enfrentarme a nuevos retos, y seguir aprendiendo en cómo ser una mejor persona.

Del mismo modo, agradezco a mis padres por todo el apoyo, esfuerzo, sacrificio y respaldo que me dieron a lo largo de mi formación profesional; y el gran apoyo moral durante el proceso de realización de mi tesis.

Agradezco a mi familia por brindarme el soporte y los consejos sabios que dejaron mis queridos abuelos, que ahora desde el cielo, nos recuerdan que el amor y la unión son las herramientas más poderosas en nuestras vidas.

A mi Universidad, donde no solo fue un lugar de aprendizaje académico, si no de encuentro de amistades que durarán para toda la vida.

A los docentes, con quienes compartí un salón de clase, contribuyendo con mi formación educacional, y fueron parte de mi vida durante estos años, brindándonos una experiencia académica que me motivaba a seguir investigando, innovando y creando. Al igual, que, a mis amigos y compañeros de carrera, quienes me acompañaron en todo este bonito y sacrificante proceso.

Y también, quiero agradecer a mi asesor de tesis, el Ing. M.SC. Jimmy Frank Oblitas Cruz, por todo el apoyo e instrucción en la realización de esta presente investigación, quien me impulsó a seguir investigando, compartiéndome sus conocimientos y consejos, que, como profesional y persona es un gran referente en la Ingeniería en Industria Alimentaria.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. PROBLEMA	3
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Formulación del problema.....	4
1.3. Justificación.....	4
II. OBJETIVOS	6
2.1. Objetivo general.....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
2.3. Hipótesis y variables.....	6
2.3.1. Hipótesis General	6
2.3.2. Variables	6
III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
3.1. Antecedentes de la investigación.....	7
3.2. Bases teóricas.....	9
3.3. Definición de términos básicos.....	28
IV. METODOLOGÍA	31
4.1. Ubicación.....	31
4.2. Materiales.....	31
4.2.1. Material biológico.....	31
4.2.2. Material y equipo de laboratorio.....	32
4.3. Metodología.....	32
4.4. Diagrama de flujo del beneficio de granos de café y evaluación de imágenes multiespectrales.....	39
4.5. Método de análisis.....	40
4.5.1. Obtención de muestras para investigación.....	40
4.6. Unidad de análisis (población y muestra).....	41
4.6.1. Unidad de análisis.....	41
4.6.2. Población.....	41
4.6.3. Muestra.....	41
4.7. Diseño de investigación.....	41
VI. CONCLUSIONES	62
VII. RECOMENDACIONES	63
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
IX. ANEXO FOTOGRÁFICO	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Rangos de longitud de onda para los diversos colores	27
Tabla 2. PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA EVALUACIÓN DE LA REFLECTANCIA Y COLOR CIELAB.....	35
Tabla 3. Imágenes multiespectrales de los 3 tratamientos de T° analizados durante los 6 días	44
Tabla 4. Firmas espectrales de los 3 tratamientos de temperatura en cada día	45
Tabla 5. Análisis de Varianza para L*	49
Tabla 6. Análisis de varianza para a*	52
Tabla 7. Análisis de Varianza para b*.....	55
Tabla 8. Varianza explicada del modelo PLS	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Electromagnético	25
Figura 2. Ubicación del experimento	31
Figura 3. Diagrama de flujo del beneficio de granos de café y evaluación de imágenes multiespectrales	39
Figura 4. DIAGRAMA DE LOCALIZACIÓN DE LA ZONA CON MAYOR NIVEL DE DISCRIMINACIÓN MULTIESPECTRAL.....	46
Figura 5. ANÁLISIS DE PCA DE CAFÉS.....	47
Figura 6. PCA COMPLETO	48
Figura 7. Diagrama de Pareto para diferenciación entre tiempo y temperatura respecto a L^*	50
Figura 8. Diagrama de efecto de la L^* respecto a cada variables según el Tiempo y la Temperatura	50
Figura 9. Representación tridimensional de la superficie de respuesta de l^*	51
Figura 10. Diagrama de Pareto para diferenciación entre tiempo y temperatura respecto a a^*	52
Figura 11. Diagrama de efecto a^* respecto a cada variables según el Tiempo y la Temperatura	53
Figura 12. Representación tridimensional de la superficie de respuesta de a^*	54
Figura 13. Diagrama de Pareto para diferenciación entre tiempo y temperatura respecto a b^*	56
Figura 14. Diagrama de efecto de b^* respecto a cada variable según el Tiempo y la Temperatura.	57
Figura 15. Representación tridimensional de la superficie de respuesta de b^*	57
FIGURA 16. PLS PARA VARIABLE L	60
FIGURA 17. PLS PARA VARIABLE A^*	60
FIGURA 18. PLS PARA VARIABLE B^*	61
FIGURA 19. VIP DE DATOS ESPECTRALES.....	61
Figura 20. Balanza analítica marca Precisa, mod. LX220A.....	68
Figura 21. Balanza.....	68
Figura 22. Colorímetro marca KONICA MINOLTA (Escala CIELAB).....	68
Figura 23. Cámara espectral marca Tetracam.....	69
Figura 24. Baño de María.....	69
Figura 25. Refrigeradoras Coldex (a $T^{\circ} = 8^{\circ}C$ y $T^{\circ} = 12^{\circ}C$).....	69
Figura 26. Humidímetro marca Precisa	70
Figura 27. Recepción del café en cereza.....	70
Figura 28. Despulpado y desmucilaginado.....	70
Figura 29. Selección de muestras ($M1 = 8^{\circ}C$, $M2 = 12^{\circ}C$ y $M3 = 16^{\circ}C$) y rotulado.....	71
Figura 30. Fermentación Sumergida	71
Figura 31. Identificación de la región a analizar.....	71
Figura 32. Extraer perfil multiespectral	72
Figura 33. Secado en bandejas	72
Figura 34. Medición de Humedad	72
Figura 35. Envasado.....	73

RESUMEN

La presente investigación se centra en la aplicación de imágenes espectrales para el monitoreo del proceso de fermentación sumergida en café de la variedad Catimor, con el propósito de contar con un método no destructivo que permita evaluar de manera rápida y precisa la calidad del grano durante este proceso crítico. Se realizaron fermentaciones controladas a temperaturas de 8°C, 12°C y 16°C, analizando diariamente la reflectancia y las coordenadas de color en el espacio CIELAB (L^* , a^* , b^*). El diseño experimental permitió evaluar la influencia del tiempo, la temperatura y su interacción sobre las características físicas y cromáticas de los granos. Los resultados demostraron que la temperatura tuvo un efecto significativo en la variación de la coordenada a^* (rojo/verde), mientras que el tiempo y la interacción tiempo–temperatura no mostraron efectos relevantes sobre la coordenada b^* (amarillo/azul). Asimismo, el análisis multivariado evidenció la capacidad de las imágenes espectrales para clasificar y diferenciar muestras de café en función de las condiciones de fermentación. En conclusión, esta tecnología representa una alternativa innovadora y eficiente que puede implementarse en línea para fortalecer los sistemas de control de calidad en la industria cafetalera, aportando valor agregado al producto y mejorando la estandarización de procesos.

ABSTRACT

This research focuses on the application of spectral imaging to monitor the submerged fermentation process of Catimor coffee, aiming to provide a non-destructive method for rapid and precise quality assessment during this critical stage. Controlled fermentations were carried out at 8°C, 12°C, and 16°C, with daily analysis of reflectance and color coordinates in the CIELAB space (L^* , a^* , b^*). The experimental design allowed the evaluation of the influence of time, temperature, and their interaction on the physical and chromatic characteristics of the beans. Results showed that temperature significantly affected the variation of the a^* coordinate (red/green), while time and the time–temperature interaction had no relevant effect on the b^* coordinate (yellow/blue). Multivariate analysis further revealed the ability of spectral imaging to classify and differentiate coffee samples according to fermentation conditions. In conclusion, this technology represents an innovative and efficient alternative that can be implemented online to strengthen quality control systems in the coffee industry, adding value to the product and improving process standardization.

INTRODUCCIÓN

El café en muchos países latinoamericanos como Perú, Colombia, Brasil, Costa Rica es un producto que tiene una importancia económico, social y ambiental. Así mismo, se cultiva en muchos países tropicales, siendo un producto preciado de la agricultura, destinado a la exportación, industrialización y posteriormente al consumo humano.

Según INEI (2021), la producción de café se incrementó un 17,.0% en julio del 2021 superando al mes del año anterior. Al ser favorecido con las mejores condiciones térmicas, benefició el desarrollo de este cultivo en Ucayali (135.11%), San Martín (58.8%), Cusco (17,6%), Cajamarca (13,1%) y Amazonas (7,6%), que en conjunto aportaron el 71,1% del total nacional.

El café contiene características organolépticas como el sabor y aroma, con relación a otras bebidas, el café es el más consumido a nivel mundial. Del mismo modo, es considerado un producto saludable, debido a su composición química que se adquiere en el proceso de fermentación. (Pérez Burillo, y otros, 2019)

Se ha encontrado la aplicación de la visión hiperespectral, técnica emergente, no destructiva y rápida, en diversos campos como la ciencia forense, la bioquímica, la medicina, la industria farmacéutica, la minería y la industria alimentaria, En particular, existen investigaciones sobre la evaluación de la calidad de los productos agrícolas, como la determinación del contenido de sólidos solubles y la firmeza, la evaluación de la acidez, la detección de deterioro o infección, el control de inocuidad de los alimentos, la inspección de amenazas y defectos biológico ocultos, la determinación del contenido de azúcar, etc., la evaluación del estado de madurez. y determinación del contenido de pigmento. (Viera Maza G. , 2018)

En este sentido, el potencial de el seguimiento de procesos utilizando las imágenes espectrales en la agricultura y la industria alimentaria se ha demostrado en varios aspectos, como la detección de cuerpos extraños, la determinación de residuos de pesticidas y antibióticos en productos agroalimentarios, la caracterización de aceites comestibles y alimentos genéticamente modificados, etc. (Baek, Kang, Hwang, Ok, Kwak, Chun, 2015).

La información espectral a partir de la cual se extraen características fundamentales para el análisis de la muestra puede ser analizada, de forma rápida y no invasiva, características físicas y químicas de un producto para la evaluación de su calidad, generalmente, seleccionando un conjunto de longitudes de onda para desarrollar un sistema multiespectral y así evitar la información redundante del sistema hiperespectral. Sin embargo, se debe considerar la posible pérdida de información importante de los datos espectrales originales. (Viera Maza G. , 2018)

I. PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

En la actualidad, la evolución del mercado y la alta competitividad han obligado a la industria agroalimentaria a mantener altos estándares de calidad, condicionando a las empresas a mejorar continuamente sus métodos y/o técnicas de control, así como, a disminuir los costes de producción. En este escenario los métodos disponibles para la evaluación de la calidad presentan una serie de desventajas; siendo las principales su uso fuera de línea de producción, carácter destructivo, demanda excesiva de tiempo, equipamiento de laboratorio sofisticado y reactivos químicos. (Wang, Sol, & Pu, 2017)

Es así que, de acuerdo a las necesidades de la industria de contar con métodos no destructivos y capaces de implementarse on-line, diversas investigaciones vienen evaluando el uso de sistemas de visión artificial para el análisis de una diversidad de alimentos (Vásquez, y otros, 2018). Estas técnicas de imágenes pueden clasificarse en imágenes hiperespectrales, imágenes raman, imágenes de resonancia magnética y rayos X. Sin embargo; estas diferentes técnicas presentan como principal desventaja baja penetración en el alimento, debido a la comúnmente reducida cantidad de energía de la fuente de energía utilizada. En tal sentido la información obtenida mediante estos sistemas se reduce imágenes quimiométricas superficiales, las cuales no brindan información del contenido al interior del producto como productos adulterados, distribución de compuestos, presencia de contaminantes, etc.

Por otro lado; en el espectro electromagnético existe un rango de alta energía y que, a diferencia de las energías usadas comúnmente, UV-VIS-NIR, es capaz de penetrar al interior de alimentos lo cual la hace interesante para efectos espectroscópicos. (Fontal, 2005)

La aplicación de la tecnología de imágenes hiperespectrales requiere una serie de pasos para recopilar, procesar y analizar la información, que ha sido desarrollada y aplicada por muchos investigadores, pero no se ha unificado en un solo sistema y proceso para uso de usuarios que no están familiarizados con las profundidades de análisis informáticos. (Castro Silpu, 2016)

En cuanto al café, un producto tradicional de mucha importancia y que a nivel nacional se exporta masivamente que por ende nos deja recursos económicos además de ser reconocido por catadores internacionales (Rikolto, 2019).

Debido a su calidad, el café es reconocido como un producto sustentable, con segmentaciones de mercado con mejores pagas de precio y con un alto índice de crecimiento, que genera puestos de trabajo a más de 2 millones de productores agrícolas peruanos (Agencia Agraria de Noticias, 2020).

Cuando llevamos a cabo el procesamiento de fermentación de café es donde el grano adquiere sabor, aroma, modifica la textura y conserva la calidad del alimento para el consumo humano, influyendo así por los parámetros establecidos en esta operación. Es ahí que influye la calidad del café, adquiriendo aromas y sabores especiales, dulces, cítricos, frutales y tostados. (Puerta & Echevarry, J., 2015)

No siendo solo estas las características que reflejan un producto con alto potencial, sino también por su valor nutricional, debido a su alto contenido de antioxidantes naturales, por su eficacia previene el envejecimiento y enfermedades crónicas (Tovar, 2013)

1.2. Formulación del problema

¿Es posible diferenciar las muestras de café en la variedad Catimor durante el proceso de fermentación sumergida mediante imágenes espectrales?

1.3. Justificación

Actualmente, la calidad y la seguridad de los productos son factores fundamentales para el crecimiento de la industria alimentaria. En esta industria se exigen exhaustivos controles de calidad y seguridad alimentaria. Sin embargo, la evaluación de la calidad de los productos agrícolas sigue realizándose mediante inspección visual por personal experimentado, lo cual es subjetivo, tedioso, inconsistente y costoso.

La presente investigación de tesis tiene como finalidad determinar hacer el seguimiento del grano de café durante el proceso de fermentación sumergida, los mismos que serán analizados mediante imágenes espectrales. Pretendiendo así recurrir a esta tecnología no destructiva, proporcionando abundante información espectral a partir de la cual se extraen características fundamentales para el análisis de la muestra. En la fermentación de los granos de café se recomienda una homogeneización al inicio de la fermentación, y al final, antes del lavado, para la medición de las características del sustrato fermentado y de los granos, pero no se recomienda una agitación continua del sistema durante el proceso de fermentación del café. Para producir etanol o ácido láctico en las fermentaciones industriales de los residuos se requiere agitación constante del sistema, con el fin de mejorar la homogeneización.

Estas imágenes pueden analizar, de forma rápida y no invasiva, características físicas y químicas de un producto para la evaluación de su calidad. Generalmente, se selecciona un conjunto de longitudes de onda para desarrollar un sistema multiespectral y así evitar la información redundante del sistema hiperespectral. (Viera Maza G. I., 2018)

El enfoque principal de la tesis es la aplicación de imágenes espectrales en granos de café en la variedad Catimor, de esta manera la investigación podrá ofrecer y aportar datos contundentes que hagan ver un plano completo sobre el tema que nos ocupa. Además, con esta investigación se pretende encontrar una solución que contribuya con la obtención de un grano de café de calidad durante el proceso de fermentación en donde se pueda garantizar un método no destructivo y capaces de implementarse on-line, por el cual se pueda analizar e interpretar desarrollar un sistema de clasificación de grano de café según su color en fase de fermentación utilizando imágenes espectrales.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general.

Determinar el efecto del tiempo y temperatura de fermentación de café en la variedad Catimor mediante el uso de imágenes espectrales y espacio de color Cielab.

2.2. Objetivos específicos.

- Determinar el nivel de clasificación de muestras de café Catimor fermentado en diferentes tiempos y temperaturas mediante el uso de imágenes espectrales.
- Determinar el efecto del tiempo y temperatura de fermentación de café variedad Catimor mediante el uso del espacio de color Cielab.
- Relacionar las imágenes espectrales con el color Cielab de los granos de café.

2.3. Hipótesis y variables.

2.3.1. Hipótesis General

Es posible diferenciar el efecto usando imágenes espectrales durante el proceso de fermentación sumergida de café en la variedad Catimor.

2.3.2. Variables

2.3.2.1. Variables independientes:

- Temperatura de fermentación sumergida del café.
- Tiempo de fermentación sumergida del café.

2.3.2.2. Variables dependientes:

- Reflectancia
- Color CIELAB

III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1. Antecedentes de la investigación

La Universidad Tecnológica de Hefei de China, en la Escuela de Biotecnología e Ingeniería de Alimentos desarrolló una investigación sobre la aplicación de imágenes multiespectrales para determinar atributos de calidad y etapa de madurez en fresa fruta; evaluando imágenes multiespectrales con 19 longitudes de onda en el rango de 405 a 970 nm para la determinación no destructiva de la firmeza, el contenido de sólidos solubles totales (TSS) y el estado de madurez en frutos de fresa. Se aplicaron varios enfoques de análisis, incluidos los mínimos cuadrados parciales (PLS), la máquina de vectores de soporte (SVM) y la red neuronal de propagación inversa (BPNN), para desarrollar modelos teóricos para predecir la firmeza y TSS de la fruta de fresa intacta. En comparación con PLS y SVM, BPNN mejoró considerablemente el rendimiento de las imágenes multiespectrales para predecir la firmeza y el contenido total de sólidos solubles con el coeficiente de correlación (r) de 0,94 y 0,83, SEP de 0,375 y 0,573 y sesgo de 0,035 y 0,056, respectivamente. Posteriormente, la capacidad de la tecnología de imágenes multiespectrales para clasificar la fruta en función de la etapa de madurez se probó utilizando SVM y modelos de redes neuronales de propagación inversa de análisis de componentes principales (PCA-BPNN). La mayor precisión de clasificación del 100% se logró utilizando el modelo SVM. Además, los resultados de todos estos modelos demostraron que las partes VIS de los espectros fueron los principales contribuyentes a la determinación de la firmeza, la estimación del contenido de TSS y la clasificación del estado de madurez en la fruta de fresa. Estos resultados sugieren que las imágenes multiespectrales, junto con un modelo de análisis adecuado, son una tecnología prometedora para la estimación rápida de los atributos de calidad y la clasificación del estado de madurez en la fruta de fresa. (Changhong , Wei, Fei, Jianbo , & Lei , 2014)

En la investigación realizada en la Facultad de Agronomía Medellín, sobre la colorimetría del fruto de café (*Coffea arabica L.*) Durante su desarrollo y maduración, obtuvieron estándares de color del café siendo necesarios para diferentes procesos relacionados con la cosecha y postcosecha de este producto. Las

coordenadas L^* , a^* , b^* , C^* y h^* en la representación de color CIELAB y la reflectancia en el espectro visible (500-700 nm) fueron medidas sobre tres diferentes puntos de la epidermis del fruto de *Coffea arabica*, variedad Colombia. La medición se realizó cada siete días, desde 182 hasta 238 días después de la anthesis (DDA), utilizando un espectrofotómetro de esfera, con el objetivo de determinar cuantitativamente el color del fruto en diferentes estados de desarrollo. Los resultados obtenidos indican que los frutos de diferentes días de maduración presentan diferencias de color definidas por la luminosidad, las coordenadas cromáticas y la cantidad de luz reflejada por la superficie del epicarpio, dependiendo de la región del espectro visible analizado. A través de las coordenadas cromáticas a^* y h^* y de varias longitudes de onda luminosa reflejadas se pueden diferenciar frutos de café de 31, 32, 33 y 34 semanas de desarrollo. El croma b^* no permite diferenciar los frutos pintones de los maduros. La saturación C^* puede discriminar algunos estados de desarrollo, pero no permite establecer diferencias entre los estados inmaduros. Las longitudes de onda 520, 570 y 580 nm permiten discriminar significativamente nueve estados diferentes de desarrollo del fruto. El conocimiento de la colorimetría de los frutos de café puede ser usado para el diseño de sistemas de recolección y clasificación postcosecha, y para la adecuada discriminación entre diferentes estados de desarrollo del fruto, los cuales están relacionados con la calidad de la bebida y con la productividad. (Carvajal Herrera, Aristizábal Torres, Oliveros Tascón, & Mejía Montoya, 2011)

La técnica de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) es una herramienta para la identificación de procedencia y la cuantificación de compuestos químicos en productos agrícolas; especialmente en café es una herramienta de autenticación, por ser de fácil utilización, precisa, reproducible, ajustable a las condiciones particulares de los productos y de bajo costo. De un ensayo en evaluación regional de progenies F5 del programa de Mejoramiento Genético de Cenicafé, ubicado en cinco localidades de la zona cafetera colombiana se tomaron muestras de café (verde y tostado) para realizar la evaluación de la técnica NIRS, utilizando un equipo de mesa y un equipo portátil, con el fin de explorar su potencial en la identificación de procedencia y cuantificación de tres compuestos químicos en café verde y tostado. Se estableció la clasificación de cinco localidades basados en la distancia de Mahalanobis, con clasificaciones superiores al 83% en café verde y del 87% en café

tostado; el error global de clasificación fue del 3% y 7% para las materias primas café verde y café tostado, respectivamente, usando el equipo portátil y el NIRS de mesa. Las ecuaciones de calibración presentaron mejor ajuste para los compuestos cafeína y trigonelina en café verde, y cafeína con ácidos clorogénicos en café tostado. Los resultados mostraron que la implementación de la técnica NIRS mediante el uso de equipos portátiles ofrece ventajas similares a los equipos de laboratorio en cuanto a robustez y exactitud, tanto para la identificación de orígenes como para la predicción de características químicas asociadas a la calidad. (Villegas Hincapié, y otros, 2014)

3.2. Bases teóricas

3.2.1. El Café (*Coffea arabica*)

El cafeto es un arbusto o árbol pequeño, perennifolio, de tronco recto que puede alcanzar los 10 metros en estado silvestre; en los cultivos se les mantiene normalmente en tamaño más reducido, alrededor de 3 metros. La Arábica fue descrita por Linneo en 1753. El café Arábica es nativo de es nativo de las tierras altas de Etiopia, también es posiblemente nativo de otras partes de África y Arabia en Asia. (Figueroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015)

3.2.1.1. Morfología del café

La morfología del café se clasifica de la siguiente manera de acuerdo a Figueroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya:

3.2.1.1.1. La Raíz

El sistema radicular es superficial estando el 60.0% en los primeros 30 centímetros. De profundidad y la raíz pivotante puede llegar a más de un metro de profundidad (Figueroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

3.2.1.1.2. Tallo principal

Yemas cabeza de serie. Dan origen a ramas plagiotrópicas primarias solamente. Tienen conexión vascular con el tallo desde el principio (Figuroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

3.2.1.1.3. Yemas seriadas.

Originan brotes ortotrópicos solamente su número puede aumentar con la edad del cafeto (Figuroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

3.2.1.1.4. Ramas primarias.

Yemas cabeza de serie. Forman ramas plagiotrópicas secundarias solamente. Yemas seriadas. Originan de 2 a 4 inflorescencias y cada inflorescencia tendrá 4-5 yemas florales. También pueden originar ramas plagiotrópicas, pero nunca darán origen naturalmente a ramas ortotrópicos (Figuroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

3.2.1.1.5. Hojas.

Son opuestas y alternas en el tallo ortotrópicos y en ramas plagiotrópicas son opuestas. Son de color verde oscuro y brillante en la parte superior y verde claro en el interior. Ovales y terminan en punta, sus bordes son ondulados. Las hojas nuevas presentan una coloración bronceada o verde claro y después toman su coloración definitiva (Figuroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

3.2.1.1.6. Flores.

Se localizan en las axilas de las hojas de las ramas plagiotrópicas. La corola es blanca y formada por 5 pétalos fusionados en su base, dando origen al tubo de la corola; el cual se encuentra inserto en la parte

superior del ovario. El ovario, normalmente con dos lóculos, contiene un ovulo por lóculo tiene cinco estambres con antenas, de color blanco y bifurcado en el estigma. (Figueroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

3.2.1.1.7. Fruto.

El fruto es una drupa de superficie lisa y brillante, de pulpa delgada fácilmente desprendible del pergamino. Cuando maduran los frutos son rojos o amarillos, con dos semillas. En ocasiones solo uno de los óvulos se fecunda y se desarrolla originando una semilla de forma redonda que se le conoce como café caracol. La café cereza se compone de la pulpa y café pergamino. La pulpa está formada por el epicarpio o cáscara o pellejo correspondiendo al 46% del fruto. El mesocarpio o mucílago miel corresponde al 17.18%. El café pergamino está constituido por el endocarpio o pajilla que representa el 18.20%. El espermodermo o película plateada representa el 0.2% y el café verde se encuentra en 17-18% del fruto. (Figueroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

3.2.1.1.8. Semilla.

Son oblongas, plano convexas, representan del 35.0 al 38.0% del fruto del café, están constituidas por el endocarpio o pergamino, una película plateada o perisperma, endosperma cotiledón o embrión. El endospermo contiene muchos compuestos, entre los que destacan la cafeína, proteínas, aceites, azúcares, dextrina, celulosa, hemicelulosa, ácido clorogénico y minerales entre otros (Figueroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

3.2.1.2. Clasificación Taxonómica

Según Lucas Suarez, la taxonomía del café se clasifica de la siguiente manera:

- Grupo: *Fanerógama*
- Clase: *Angiospermas*
- Sub - Clase: *Dicotiledónea*
- Orden: *Rubiales*
- Familias: *Rubiácea*
- Género: *Coffea*
- Especie: *arabica L.*
- Nombre científico: *Coffea arabica*

3.2.1.3. Condiciones ambientales del cultivo de café

Las condiciones ambientales del cultivo de café se rigen por los factores agroecológicos para realizar una buena cosecha, los cuales son los siguientes a tener consideración:

3.2.1.3.1. Temperatura.

Esta debe ser entre los 17 a 26°C. La temperatura es muy importante porque si es menor a 16 grados se pueden quemar los brotes, y si la temperatura sobrepasa los 27 grados hay más riesgo de deshidratación de la planta con reducción de la fotosíntesis. (Figuroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015)

3.2.1.3.2. Altura.

La altura apropiada para la producción del café es de entre 900 a 1600 metros sobre el nivel del mar. Si se cultiva el café a menor altura, los costos de producción aumentan, ya que se reduce la calidad de los granos de café. En cambio, si se cultiva a mayor altura de la aconsejada, se produce un menor crecimiento de las plantas. (Figuroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015)

3.2.1.3.3. Viento.

Los vientos también son importantes en la producción del café, porque si los vientos superan los 30 Km. /h se produce un daño en la planta con la caída de hojas, rotura de flores y frutos y deshidratación de las yemas. (Figueroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015)

3.2.1.3.4. Precipitación.

El agua natural que reciben las plantas es esencial, pero si es excesiva puede ser perjudicial. Por ello, el rango establecido de precipitaciones necesarias para la producción de café es de, entre 1,000 a 3,000 milímetros/año. Si llueve más se producen hongos, y si reciben menos lluvias la producción disminuye, porque se reduce el crecimiento de las plantas de café. (Figueroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015)

3.2.1.3.5. Luminosidad

El café es una planta de días cortos, lo que significa que florece cuando la noche tiene una duración mayor que el día. Además del fotoperiodo, el brillo solar es otro componente de la luminosidad de importancia para la planta. Es un indicador de la cantidad de la energía lumínica recibida en la superficie terrestre. Se considera como un factor climático de acumulación, cuando interactúa con la cantidad de biomasa disponible en hojas, determinando la productividad potencial del cafetal. El proceso de acumulación de biomasa del cultivo de café depende fundamentalmente de la cantidad de energía recibida, reflectancia y redistribuida por la planta. En general, para un buen desarrollo del café, el brillo solar óptimo es de 4 a 7 horas de luz/día (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2019)

3.2.1.3.6. Humedad.

La humedad es también muy importante y va de la mano de las precipitaciones. Si la humedad relativa es mayor a 90.0% hay riesgo de que la planta se enferme con hongos. Por ello, se aconseja que el ambiente tenga en un 65.0 a 90.0% de humedad. (Innatia, s/f). (Figuroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015)

3.2.1.4. Variedades de café

A continuación, se describirán a las variedades de café más importantes y por ende los más cultivados.

3.2.1.4.1. Variedad Caturra

Esta variedad de café es probablemente el resultado de una mutación genética dominante del café Bourbon de Minas Gerais en Brasil. Tiene una amplia distribución por ser una planta de tallo corto con entrenudos cortos y tallo grueso, por lo que tiene un alto rendimiento productivo; se ve sólido y compacto (Figuroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

Los brotes apicales tienen un color verde similar al de Borbón. Además, es más precoz y productiva que las líneas Típica y Bourbon. Aunque esta variedad es muy susceptible a la roya del café causada por el hongo *Hemileia vastatrix*, una buena fertilización y un buen control de esta plaga asegurarán una buena producción final (Figuroa Hernandez, Pérez Soto, & Godinez Montoya, 2015).

En el mutante rojo de Caturra, los frutos adquieren un color rojo vinoso a la madurez, mientras que, en el mutante amarillo, un color amarillo. El porte reducido de la variedad Caturra constituye una de sus grandes ventajas, ya que facilita la recolección (Paucar Anchirayco, 2010).

3.2.1.4.2. Variedad Catuaí

Esta variedad proviene del cruzamiento entre las variedades Caturra y Mundo Novo en Brasil. La planta es de porte bajo, entrenudos cortos y muy vigorosos. Tiene brotes verdes, hojas elípticas y frutos de color rojo y amarillo; ramas laterales con muchas palmillas; alta capacidad productiva y una buena calidad en la taza. La maduración del fruto es mediana a tardía. Es susceptible a la roya del café (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2019).

Las hojas de Catuaí son onduladas y tienen generalmente puntas verdes, pero he visto puntas bronceadas en algunos casos. El fruto no cae de la rama tan fácilmente y esto la hace una buena opción para las zonas con lluvias o vientos fuertes. La planta es una variedad de alto rendimiento y produce cerezas redondas de tamaño medio. En general, se tornan rojas o amarillas cuando maduran, pero existen raros casos de Catuaí naranja (PERFECT DAILY GRIND, 2019).

3.2.1.4.3. Variedad Catimor

La variedad Catimor se origina del cruzamiento del Caturra rojo con el híbrido Timor. El cafeto Catimor se caracteriza por su uniformidad en el porte bajo de las plantas, hojas anchas de color verde oscuro, brotes bronceados, ramas largas con entrenudos cortos, precocidad en crecimiento y producción, además de su productividad relativamente alta. Se recomienda para alturas por encima de los 1000 m.s.n.m. Con respecto a la maduración, se ha observado que es más temprana y menos concentrada que el Caturra. Los frutos se caracterizan por su color rojo, reducida cantidad de frutos dañados, bajo porcentaje de granos defectuosos, tamaño regular de grano y buena calidad de bebida (Pauca Anchirayco, 2010).

3.2.1.4.4. Variedad Bourbon

Bourbon tiene la misma estatura alta y forma cónica que Típica, pero es un poco más frondosa con más ramas secundarias. Noto que los troncos principales son más grandes y las ramas parecen ser más gruesas, así que la planta es más robusta y menos flexible que la de Típica. Además, la distancia entre las ramas y los nudos es un poco más corta. Esta densidad más elevada implica que Bourbon produce aproximadamente el 30% más de frutos que Típica. (PERFECT DAILY GRIND, 2019)

Las hojas son más anchas que las de Típica y tienen una textura irregular con bordes ondulados. Las hojas jóvenes suelen ser verdes, pero a veces tienen puntas bronceadas. Las cerezas son redondas y, cuando maduran, se tiñen de una gama de tonos rojos, naranjas o amarillos (pero no varían en la misma planta). (PERFECT DAILY GRIND, 2019)

3.2.1.4.5. Variedad Geisha/ Gesha

Es fácil reconocer esta variedad sumamente popular gracias al ángulo de las ramas superiores y la forma de la planta. Las ramas en la parte superior se estiran hacia el cielo en un ángulo de entre 45 y 50°. Geisha/Gesha tiene una estatura alta con una gran distancia entre las ramas y los nudos. El tronco y las ramas son delgados, un poco como en el caso de Típica. (PERFECT DAILY GRIND, 2019)

Las hojas son suaves y alargadas, y las cerezas también son alargadas de forma similar al fruto de Típica. En mi experiencia, la principal diferencia visible entre Geisha/Gesha y Típica es que la primera tiene una forma de paraguas o una cima plana, mientras que Típica tiene una forma cónica.

Las cerezas de Geisha/Gesha tienen un sabor completamente diferente de otras variedades. Tienen notas cítricas, dulzor y un elemento floral que recuerda al jazmín (PERFECT DAILY GRIND, 2019).

3.2.1.5. Estado Físico del Grano de Café

La evaluación física consiste en la valoración de las características físicas de los granos de café, principalmente: color, uniformidad, tamaño, defectos y humedad de los granos de café verde (Cortés Flores, 2020)

3.2.1.6. Defectos físicos del Grano de Café

Los defectos del café se generan por un inadecuado procesamiento e inmadurez en el momento que se cosecharon las cerezas de café. Otros factores que determinan la cantidad de defectos encontrados son las temperaturas mayores a 55°C durante el secado, estrés hídrico, falta de nutrientes, sobre fermentación, almacenamiento y trillado de café húmedo. Los defectos en los granos de café verde, se clasifican en primario y secundarios, los mismos que afectan directamente la calidad de la bebida en taza y esto refleja en el precio del café, por lo que se consideran graves, entre ellos están granos totalmente negros o agrios, blanqueados, entre otros (Cortés Flores, 2020).

Considerando los defectos más importantes, describiremos de la siguiente manera:

3.2.1.6.1. Materia Extraña:

No originada de la fruta del café, por ejemplo: partículas de plástico, metal, costales, partículas de cordón, piedras, ramas, etc. (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.6.2. Grano agrio:

Los granos se reconocen por su color amarillo pálido, amarillo intenso, o rojizo. Si el grano se raspa o corta, libera un olor agrio similar al vinagre. Una vez tostado y molido, un solo grano agrio puede contaminar la bebida de café en taza (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.6.3. Grano quebrado:

Los granos quebrados pueden considerarse como granos partidos. Mordidos o cortados, generalmente presentan una coloración rojiza oscura, debida a daños mecánicos durante el proceso de beneficio húmedo. Esta lesión puede ser un inicio de actividad bacteriana, fermentaciones y crecimiento de hongos, resultando en una amplia gama de sabores defectuosos en taza. Los granos partidos o cortados por la máquina trilladora son fragmentos de granos limpios (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.6.4. Grano inmaduro:

Los granos inmaduros se reconocen por su tamaño pequeño, de baja densidad, de forma cóncava y con bordes afilados. La tradicional película plateada o tegumento es generalmente de color pálido amarillento o verdoso y firmemente adherida al grano de café (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.6.5. Grano picado o brocado:

Este grano se distingue por las pequeñas y oscuras perforaciones de 0.3 a 0.5 mm de diámetro. El daño puede verse en cualquier ángulo, incluso longitudinal. Algunos granos presentan ataques con más de tres perforaciones (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.6.6. Grano negro:

Se distingue por su color opaco (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.6.7. Grano de elefante:

Son granos más grandes de lo normal para su variedad, debido a que una semilla de las semillas tiene un desarrollo mayor que la otra (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.6.8. Grano triángulo:

Con dos lados planos y uno convexo (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.6.9. Daño por hongo:

Los hongos se reconocen en el grano por las manchas que presenta el grano de café, mayormente las manchas de color amarillo- rojizo recubren de un polvillo, que van creciendo en tamaño hasta cubrir completamente el grano (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.6.10. Blanqueado:

Es un grano con decoloración de la superficie debido a bacterias del género *Coccus* durante el almacenamiento o transporte, asociado con cultivo viejo (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.7. Composición química del grano de café

La composición química del café verde es muy compleja y está integrada por carbohidratos (polisacáridos y/o monosacáridos), esteroles, ácidos grasos, ácidos fenólicos, polifenoles, compuestos nitrogenados (alcaloides), proteínas, aminoácidos libres, vitaminas y minerales entre otros. (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.7.1. Agua

El contenido de agua influye en la germinación, crecimiento, fermentación, secado, almacenamiento y tostado. El café pergamino debe secarse de un 10 – 12% de humedad, con el fin de mantener sus estabilidad química y microbiológica durante el almacenamiento y así obtener buenas características sensoriales en el tostado.

3.2.1.7.2. Carbohidratos

Los principales precursores del aroma son los carbohidratos insolubles (celulosa y hemicelulosa), carbohidratos solubles (arabinosa, fructosa, galactosa, sacarosa y rafinosa) (Cortés Flores, 2020). Los carbohidratos de bajo peso molecular, como la sacarosa, glucosa y fructosa, contribuyen a la formación de ácidos y compuestos volátiles durante el tostado mediante las reacciones de Maillard (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.7.3. Proteínas

El perfil proteico del café cambia durante el tostado, se forman melanoidinas y compuestos volátiles, péptidos y aminoácidos libres que constituyen hasta el 1.5% del café verde (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.7.4. Lípidos

Los lípidos contribuyen a la formación de aroma durante el proceso de tostado debido a las reacciones de descomposición y autooxidación. Estos compuestos se encuentran principalmente en el endospermo de los granos de café verde y solo una pequeña cantidad se encuentra en la capa externa del grano (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.7.5. Cafeína

La cafeína es una metilxantina y es el principal ingrediente activo del café y contribuye al amargor de la bebida; su contenido varía según la variedad y cultivo, puede alcanzar el 3% y 5% en *C. arabica* y *C. Canephora*, respectivamente (Cortés Flores, 2020). Este alcaloide se sintetiza principalmente a través de pasos de metilación y un paso de nucleosidasa catalizada por un gen específico que codifican enzimas. La cafeína se acumula rápidamente en los frutos del café y la síntesis disminuye notablemente antes de la etapa de madurez (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.7.6. Trigonelina

También llamado ácido N-metilnicotínico, es un derivado de la piridina que contribuye al amargor de la bebida y, al igual que la cafeína, es precursor de compuestos volátiles en el café tostado como furanos, alquilpiridinas y pirroles señalan que el contenido de Trigonelina en los granos de café verde están dentro del rango de 0.88 a 1.77% en *C. arabica*, 0.75 a 1.24% en café *C. Canephora* (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.7.7. Ácidos clorogénicos

Los ácidos clorogénicos (CGA) son una familia de ésteres formados entre uno y más derivados de ácido fenólico y ácido químic. Los tres subgrupos principales CGA son: Ácido cafeoilquínicos (CQA), 5 -CQA incluido, ácidos si-cafeoilquínicos (3-diCQA) y ácidos feruloilquínicos (FQA), los cuales representan aproximadamente 67%, 20% y 13% del total de CGA en *C. canephora* y 80%, 15% y 5% en *C. arabica*, respectivamente; el contenido de estos ácidos en los granos de café varía según la especie, clima, suelo y el grado de madurez (Cortés Flores, 2020).

El promedio del contenido de CGA del café maduro *C. arabica* varía entre 5.24% a 7.61% y difiere de *C. canephora* que varía entre 7.45% y 10.59%, indicándonos que varía con el grado de maduración, la especie y otros factores asociados a la calidad de café, tal como la altura y la presencia o ausencia de sombra e inclusive se les relaciona con la resistencia a algunas enfermedades. Estos ácidos son precursores del sabor y de los pigmentos del café tostado. La composición bioquímica de los granos de café verde es decisiva para la calidad sensorial mediante reacciones químicas generadas por el tostado (Cortés Flores, 2020).

3.2.1.8. Factores de la fermentación del café

Durante la fermentación natural del café ocurren diferentes procesos bioquímicos, en los cuales las enzimas producidas por las levaduras y bacterias presentes en el mismo mucílago fermentan y degradan sus azúcares, lípidos, proteínas y ácidos, y los convierten en alcoholes, ácidos, ésteres y cetonas. Estas sustancias formadas cambian las características de olor, color, pH y composición del sustrato (el mucílago) y también de los granos de café (CENIFACÉ, 2015).

La velocidad y la clase de productos generados en la fermentación del café dependen de factores que afectan el metabolismo de los microorganismos como la temperatura externa, el tipo de sistema de fermentación, el tiempo de proceso, la calidad del café en baba, la acidez del sustrato, la disponibilidad de oxígeno y la higiene (CENIFACÉ, 2015).

3.2.1.9. Sistemas de fermentación del café

3.2.1.9.1. Fermentaciones sólidas

El café despulpado se deposita en el fermentador, no se adiciona agua. El desagüe del fermentador se mantiene cerrado (CENIFACÉ, 2015).

3.2.1.9.2. Fermentaciones sumergidas

El café en baba se deposita en el fermentador y luego se agrega agua, en cierta cantidad, con relación a la masa de café a fermentar, de esta forma cambian la composición química y microbiológica del sustrato. Los sistemas de fermentación sumergidos son más homogéneos que los de sustrato sólido. Para el café se recomiendan fermentaciones sumergidas al 30%. Se taponan el desagüe del fermentador y se adicionan 30 L de agua limpia por cada 100 kg de café baba (CENIFACÉ, 2015).

3.2.1.9.3. Tipo de alimentación del sustrato

Las fermentaciones del café se hacen de forma discontinua, debido a los tiempos de recolección del café; así, cada lote de café despulpado se fermenta y seguidamente se lava y se seca. En las fermentaciones continuas industriales se suministra nuevo sustrato después de determinado tiempo de proceso y también microorganismos fermentadores, además simultáneamente se van retirando los productos (CENIFACÉ, 2015).

3.2.1.9.4. Abiertos y cerrados

En las fermentaciones del café abiertas ocurren natural y simultáneamente las fermentaciones lácticas por *Lactobacillus spp.* y *Streptococcus spp.*, y la fermentación alcohólica por las levaduras, principalmente *Saccharomyces cerevisiae*. Por el contrario, en los sistemas cerrados, los fermentadores se tapan, lo cual favorece también el desarrollo de fermentaciones mixtas, por las *Enterobacteriácea* (CENIFACÉ, 2015).

3.2.1.9.5. Aireación

Usualmente, en la fermentación discontinua no se agrega ni quita oxígeno y en los sistemas abiertos el CO₂ sale naturalmente del sistema. En los procesos continuos se requiere suministro de oxígeno para mantener el crecimiento de las levaduras y bacterias fermentadoras (CENIFACÉ, 2015).

3.2.1.9.6. Agitación

En la fermentación de los granos de café se recomienda una homogeneización al inicio de la fermentación, y al final, antes del lavado, para la medición de las características del sustrato fermentado y de los granos, pero no se recomienda una agitación continua del sistema durante el proceso de fermentación del café. Para producir etanol o ácido láctico en las fermentaciones industriales de los residuos se requiere agitación constante del sistema, con el fin de mejorar la homogenización y los rendimientos (CENIFACÉ, 2015).

3.2.1.10. Calidad de Café

La calidad del café también se refiere a las características intrínsecas del grano, es decir, a las características físicas y organolépticas que inciden principalmente en el precio de la venta del café. Sobre la calidad de grano influye a su vez en forma determinante la composición química del grano, condicionada por la constitución genética de la especie, si es *C. arábica* o

C. canephora. El mismo autor, determinó que los frutos verdes generaron la mayor proporción de granos defectuosos (72%), seguidos por los frutos pintones (7%), sobre maduros (3%) y maduros (2%). El mayor daño en cuanto a la calidad se refiere es producido por los granos obtenidos de cerezas verdes. En mucho menor grado por los granos procesados de frutos pintones y sobre maduros (De La Cruz Samaniego & Zurita Rivera, 2021).

3.2.2. Espectro electromagnético

Las ondas electromagnéticas consisten en campos eléctricos y magnéticos. Estas son perturbaciones del campo electromagnético, al igual que el sonido (ondas de sonido) de las perturbaciones de la presión atmosférica. Estas dos perturbaciones oscilan simultáneamente, pero en dos planos perpendiculares entre sí. Por lo tanto, las ondas electromagnéticas pueden considerarse como la propagación de una perturbación eléctrica. Estas ondas electromagnéticas viajan a través del aire y el vacío a la velocidad de la luz, o 300 000 km/seg (Ventura, 2007).

3.2.2.1. Tecnología de Imágenes Espectrales

Las imágenes espectrales se basan en la captura de información de un objeto en varias longitudes de onda del espectro electromagnético. Esta tecnología permite analizar características físicas y químicas de los productos agrícolas de manera no invasiva y rápida, siendo aplicadas exitosamente en el control de calidad de alimentos (Gowen, A. A., O'Donnell, Cullen, P. J., Downey, G., & Frias, J.M., 2007). Las imágenes multiespectrales se enfocan en un conjunto específico de longitudes de onda, reduciendo la redundancia de datos, mientras que las imágenes hiperespectrales capturan un espectro continuo y detallado, proporcionando una mayor precisión en la identificación de propiedades de la muestra.

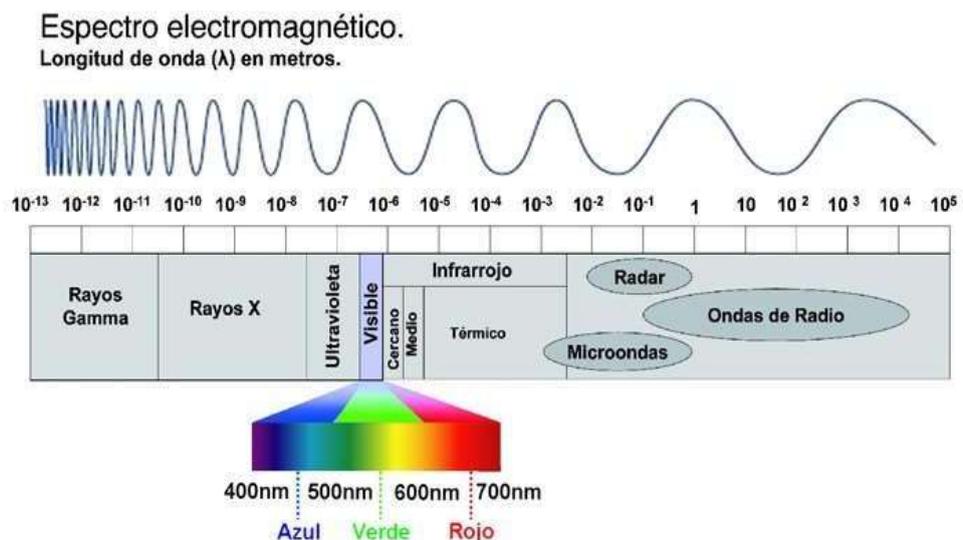
3.2.2.2. Tecnología NIR

La espectroscopia de infrarrojo cercano es una técnica en el campo de la espectroscopia molecular, que estudia la interacción de la radiación electromagnética con la materia (Heise, 2004).

El análisis de infrarrojo cercano (NIR) es una técnica espectroscópica que utiliza de forma natural el espectro electromagnético. La región NIR es el área del espectro definida por longitudes de onda entre 700 nm y 2500 nm. El infrarrojo cercano es un método de análisis rápido y preciso (Mills, 2021).

El espectro electromagnético se divide en varias regiones donde cada región representa un tipo específico de transición molecular. Por ejemplo, en la Figura 01, los rayos X tienen longitudes de onda de solo unos pocos nm y son muy dañinos porque rompen enlaces químicos e ionizan moléculas. En comparación, el infrarrojo cercano (780 y 2500 nm) no es dañino. Las moléculas simplemente absorben la luz infrarroja según la naturaleza de la muestra (Mills, 2021).

FIGURA 1. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO



3.2.2.3. Ventaja de NIR

Las ventajas generales de utilizar el análisis NIR es que proporciona datos de análisis rápidos para una mejor toma de decisiones en los procesos de producción agroalimentaria. En comparación con los métodos de análisis tradicionales, requiere poca o ninguna preparación de muestra y no necesita de productos químicos ni consumibles. Además, es un método no destructivo, fácil de usar, rápido (30-60 segundos), seguro y preciso (Mills, 2021).

Según Mills (2021), el principio de funcionamiento se puede definir de la siguiente manera:

- La luz del infrarrojo cercano se dirige a una muestra.
- La luz se modifica de acuerdo con la composición de la muestra y se detecta esta luz modificada (ver transmisión y reflectancia a continuación).
- Las modificaciones espectrales se convierten en información sobre la composición de la muestra.
- Estos algoritmos de conversión se denominan "calibraciones".

3.2.2.4. Transmisión y reflectancia

Se puede obtener un espectro infrarrojo pasando luz infrarroja a través de una muestra y determinando qué fracción es absorbida por la muestra (transmisión). Alternativamente, la luz puede reflejarse de la muestra y las propiedades de absorción pueden extraerse de la luz reflejada (reflectancia). La reflectancia NIR es un tema en sí mismo que no se tratará en detalle aquí (Mills, 2021).

Los métodos de reflectancia y transmitancia NIR se pueden elegir de acuerdo con el trabajo de análisis, por ejemplo, la transmitancia es buena para medir el queso o la carne y así obtener una medida representativa en toda la muestra. Para muestras homogéneas como la leche en polvo, los piensos o harinas, la reflectancia es ideal (Mills, 2021).

Para ambos métodos, el rango de longitud de onda NIR es una consideración importante. Por ejemplo, un rango NIR de onda corta (850 - 1050 nm) proporciona una buena penetración de la muestra con transmisión NIR. (Mills, 2021)

3.2.2.5. Espectro Visible.

La luz visible viaja a través del espacio y es detectada por el ojo humano siendo una forma de radiación, responsable de la percepción visual; es así que se puede clasificar en 6 gamas que van desde el violeta iniciando en 390nm y culminando en el rojo en 780 nm, como se muestra en la siguiente tabla. (Hecht, 2017)

TABLA 1. RANGOS DE LONGITUD DE ONDA PARA LOS DIVERSOS COLORES

Color	Longitud de onda (λ) nm
Rojo	780-622
Anaranjado	622-597
Amarillo	597-577
Verde	577-492
Azul	492-455
Violeta	455-390

FUENTE: (HECHT, 2017)

3.2.2.6. Espectro Infrarrojo

Según el Centro Público de Investigación del Sistema CONAHCYT en el 2020, la espectroscopia infrarroja, una variante de la espectroscopía vibracional, detecta la absorción de radiación infrarroja por una muestra, proporcionando detalles sobre los grupos funcionales presentes. Para absorber esta radiación, una molécula debe experimentar un cambio en su momento dipolar debido a movimientos vibracionales o rotacionales. La fluctuación en el momento dipolar crea un campo que interactúa con el campo eléctrico de la radiación electromagnética. Cuando la frecuencia de la radiación coincide con la frecuencia de vibración natural de la molécula, se produce una transferencia de energía, resultando en cambios en la amplitud de la vibración molecular y, por ende, en la absorción de la

radiación, denominada activa en el IR. Del mismo modo, la rotación de moléculas asimétricas genera una fluctuación dipolar periódica, permitiendo la interacción con la radiación. En un espectro infrarrojo, la transmitancia (o absorbancia) se representa en el eje vertical, mientras que el número de onda (cm⁻¹) se ubica en el eje horizontal.

3.2.2.7. Tecnología de Imágenes Espectrales

Las imágenes espectrales se basan en la captura de información de un objeto en varias longitudes de onda del espectro electromagnético. Esta tecnología permite analizar características físicas y químicas de los productos agrícolas de manera no invasiva y rápida. Las imágenes multiespectrales se enfocan en un conjunto específico de longitudes de onda, reduciendo la redundancia de datos, mientras que las imágenes hiperespectrales capturan un espectro continuo y detallado, proporcionando una mayor precisión en la identificación de propiedades de la muestra.

3.3. Definición de términos básicos

3.3.1. Temperatura de fermentación sumergida del café.

Se encontró que la temperatura del ambiente donde se desarrolla la fermentación controlada del café diferencia la proporción y tipo de aromas y sabores de la bebida, así como, las cantidades de sustancias volátiles del café tostado y del mucílago fermentado. Las diferencias se atribuyen al efecto de la fermentación, debido a que todos los otros factores como origen geográfico del café, variedad, madurez, agua de proceso, secado y métodos de análisis se mantuvieron constantes (CENIFACÉ, 2015).

Demostraron que la temperatura tiene efecto en la velocidad de las degradaciones del mucílago de café. Mediante la refrigeración entre 4 y 8°C se retrasó la velocidad de las fermentaciones alcohólicas y lácticas; así, en refrigeración a las 31 horas se degradó el 20% de los azúcares reductores en

comparación con 30% a temperatura promedio de 23°C; por otro lado, a las 20 horas de fermentación el mucílago de café presentó una acidez 3,5 veces mayor que la inicial, mientras que en el mucílago refrigerado por el mismo tiempo esta acidez solo aumentó un 20% con respecto al mucílago fresco (CENIFACÉ, 2015).

3.3.2. Tiempo de fermentación sumergida del café.

El tiempo de fermentación es la variable que el caficultor puede fijar dentro de un rango, para diferenciar la calidad de su café, de esta manera puede decidir según el sistema de fermentación, las características a acentuar en su café y darle valor agregado al producto (CENIFACÉ, 2015).

En las fermentaciones controladas del café, a medida que pasa el tiempo de fermentación, dentro de un rango límite, se favorece que los granos de café inmersos en el sustrato sólido o sumergido adsorban los compuestos resultantes de la fermentación del mucílago. De esta manera, según el tiempo, la temperatura y el sistema de fermentación se modifican las características, intensidades y frecuencias de los sabores especiales y de los compuestos químicos y volátiles presentes en el café (CENIFACÉ, 2015).

3.3.3. Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS)

La espectroscopia en el infrarrojo cercano es una técnica que forma parte del campo de estudio de la espectroscopia molecular, la cual estudia la interacción de la radiación electromagnética con la materia (Heise H, 2004). Es una herramienta para la identificación de procedencia y la cuantificación de compuestos químicos en productos agrícolas; especialmente en café es una herramienta de autenticación, por ser de fácil utilización, precisa, reproducible, ajustable a las condiciones particulares de los productos y de bajo costo. De un ensayo en evaluación regional de progenies F5 del programa de Mejoramiento Genético de Cenicafé, ubicado en cinco localidades de la zona cafetera colombiana (Villegas Hincapié, y otros, 2014).

3.3.4. Absorbancia

Cuando un haz de luz incide sobre un cuerpo traslucido, una parte de esta luz es absorbida por el cuerpo, el haz de luz restante atraviesa dicho cuerpo; a mayor cantidad de luz absorbida, mayor será la absorbancia del cuerpo, y menor cantidad de luz transmitida por dicho cuerpo (Hernández 2002).

3.3.5. Colorimetría de café

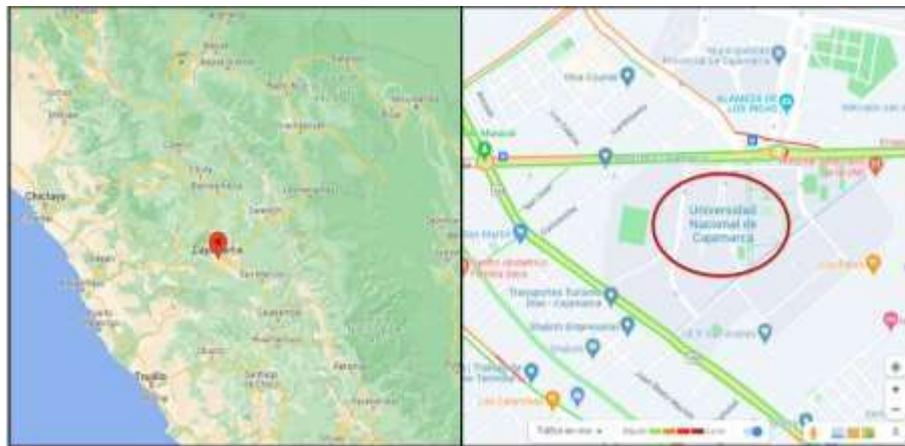
Cuando las personas clasifican visualmente los frutos de café por estados de maduración, hay mucha subjetividad debido a que existen diferentes estados de desarrollo que aparentemente comparten igual coloración sobre la epidermis. La colorimetría es un método físico no destructivo muy utilizado para determinar el color de una muestra. Para medir el color se utiliza un instrumento calibrado denominado colorímetro o un espectrofotómetro que también permite obtener la curva espectral. La función del colorímetro, en el caso de un producto vegetal, es describir de una manera cuantitativa la coloración de la epidermis (Carvajal Herrera, Aristizábal Torres, Oliveros Tascón, & Mejía Montoya, 2011).

IV. METODOLOGÍA

4.1. Ubicación

La ubicación de la investigación se realizará en la ciudad de Cajamarca, en el Laboratorio de Bioingeniería y Fermentaciones Industriales de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Cajamarca.

FIGURA 2. UBICACIÓN DEL EXPERIMENTO



NOTA: UBICACIÓN DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA OBTENIDA DE GOOGLE MAPS.

4.2. Materiales

4.2.1. Material biológico

Los frutos del café cerezo en la variedad Catimor se obtuvo de un proveedor dedicado al cultivo de café en una finca productora de café, ubicada en la provincia de San Ignacio, región Cajamarca – Perú, dichos frutos fueron selectamente escogidos por forma, tamaño y color. Las muestras fueron trasladadas a la ciudad de Cajamarca en una cámara de frío para evitar una fermentación anticipada, para posteriormente dar inicio rápido al proceso de investigación.

- Café cereza (Variedad Catimor)

4.2.2. Material y equipo de laboratorio

- Mesa de Acero Inoxidable
- Termómetro digital de -50.0 a 150.0 °C marca HANNA Instruments.
- Balanza analítica marca Precisa, mod. LX220A.
- Colorímetro marca KONICA MINOLTA (Escala CIELAB).
- Cámara espectral marca Tetracam.
- Humidímetro marca Precisa.
- Balanza.
- Refrigeradoras marca Coldex.
- Baño de María.
- Máquina selladora.

4.2.3. Material de escritorio

- Hojas de papel bond
- Lapiceros
- Plumón indelible
- Cinta
- Laptop
- Cámara de celular
- Memoria USB de 32 GB

4.3. Metodología

La presente tesis, fue de tipo experimental, optando por tener un control riguroso de las variables de estudio analizando cambios y modificaciones en las variables dependientes para la evaluación de los parámetros de calidad y fermentación del café utilizando la espectrometría de reflectancia óptica, de nivel explicativo y propositivo.

El sistema que se utilizó consta de un módulo Vis – NIR, con una cámara Tetracam ADC Micro con sensibilidad, con un rango de 520 nm a 920 nm, acoplada a una fuente de diodos emisores de luz (LED) con tres bandas: verde, rojo y NIR. Se realizó un diseño de soporte mecánico para los

componentes seleccionados que permitieron alinearlos precisamente con la cámara espectral; además de proteger el sistema óptico, electrónico para poder realizar las tomas de imágenes espectrales de alta calidad. Cuando se precisó la adaptación al módulo, se realizaron pruebas para evaluar su correcto funcionamiento cumpliendo con el objetivo de su diseño; así mismo, se configuró para realizar calibraciones para continuar obteniendo imágenes con alta calidad.

Posteriormente se usó el software PixelWrench2, el mismo que está adaptado para la cámara espectral Tetracam ADC Micro, potente programa de edición de imágenes que incluye herramientas específicas para imágenes multiespectrales. El programa acepta NIR/Verde/Rojo u otras bandas de imágenes capturadas de la familia ADC o MCA de sistemas de detección Tetracam y alinea los registros y los vuelve a combinar de acuerdo con algoritmos estándar o definidos por el usuario para producir nuevas imágenes y monitorearlas.

4.3.1. Componentes del módulo del sistema multiespectral.

4.3.1.1. Cámara multiespectral Tetracam

Mencionada cámara funciona captando la luz en varios espectros del espectro electromagnético, en lugar de solo en el espectro visible, constando de un sensor de imagen que se encarga de detectar la luz y la convierte en señal eléctrica.

4.3.1.2. Monitor

Nos muestra la información que se logra captar al realizar la toma de muestra, permitiendo tener una mejor visión y configuración del equipo.

4.3.1.3. Microcontroladores

El control del usuario del ADC Micro se logra a través de menús de sistema jerárquicos como el que se muestra a continuación. Los menús del sistema presentan a los usuarios una serie de opciones de configuración. Desplazarse y seleccionar estos configura la cámara.

Los menús del sistema son visibles a través de una pantalla de video (suministrada por el usuario) interconectada por el ensamblaje de la caja de control y prueba micro ADC que se describe a continuación.

Los menús se pueden navegar por medio de botones visibles en la parte superior de la cámara. Vistos de izquierda a derecha, le permiten desplazarse hacia arriba, hacia abajo o elegir una selección de menú específica. Un botón adicional en el extremo derecho del panel le permite tomar una foto.

A la izquierda de estos botones, el ADC Micro contiene un conector USB. Se puede acceder a los menús del sistema a través del software del sistema (PixelWrench2) que se ejecuta en una computadora con Windows conectada al ADC a través de su interfaz USB.

4.3.1.4. Panel de control

El conjunto de caja de control y prueba ADC Micro (que se muestra a la derecha) se incluye con cada sistema ADC Micro. Esto se suministra con un cable adjunto. El cuadro contiene botones que permiten al usuario desplazarse manualmente hacia arriba y hacia abajo a través de los menús del sistema, elegir una selección o tomar una foto. A través de su conector de E/S múltiple de 15 pines, esta caja también se puede usar para interconectar la cámara con las líneas de transmisión y recepción RS232 de un receptor GPS opcional para determinar las coordenadas GPS en el momento de la captura de la imagen. La caja también se puede usar para interconectar la salida de señal de video NTSC o PAL de la cámara a un monitor externo.

4.3.1.5. Lámparas halógenas

Las lámparas halógenas producen un espectro continuo de luz desde el infrarrojo profundo, que se logra a bajas temperaturas, hasta colores fríos, en este caso hasta el violeta. Debido a que el filamento de las lámparas puede funcionar a temperaturas más altas que unas lámparas no halógenas. El espectro cambia al azul, produciendo luz con una temperatura de color muy efectiva.

4.3.1.6. Laptop

Este equipo nos permitirá procesar la información espectral recibida desde la cámara que toma la captura de la muestra a evaluar.

4.3.1.7. Muestra

En este caso, la muestra a evaluar es el grano de café en la secuencia de fermentación sumergida.

En la siguiente Tabla N° 2, se mostrará el diseño experimental con los tres tratamientos a evaluar:

TABLA 2. PARÁMETROS DE CONTROL PARA LA EVALUACIÓN DE LA REFLECTANCIA Y COLOR CIELAB

Tratamiento	Variables independientes	Variables dependientes
1	Tiempo (6 días)	Reflectancia
2	Temperatura	
3	(M1=8°C, M2=12°C y M3=16°C)	Color CIELAB

El procedimiento que se adoptó, se obtuvo de la siguiente forma:

4.3.2. Recepción del café en cereza:

Se verificó la calidad de la cereza recolectada, evitando el ingreso de frutos verdes, agrios o secos, ya que estos constituyen defectos que pueden permanecer en el pergamino y afectar la calidad del café oro (CENIFACÉ, 2015).

Este control inicial permitió garantizar que el proceso partiera de una materia prima homogénea, reduciendo la probabilidad de defectos que alteren la calidad final del café.

4.3.3. Despulpado y desmucilaginado

El despulpado se realizó manualmente, separando la cáscara del fruto y conservando parte del mucílago, lo cual resulta fundamental para la posterior formación de compuestos aromáticos y de sabor durante la fermentación (Puerta & Echevarry, J., 2015).

La decisión de realizar un despulpado manual contribuyó a conservar el mucílago necesario para la formación de compuestos de aroma, lo que favoreció un análisis más realista del proceso fermentativo.

4.3.4. Fermentación Sumergida

Se acondicionaron tres muestras para fermentación sumergida. Los granos despulpados se colocaron en bolsas de polietileno de primer uso, cerradas herméticamente y sumergidas en agua en una proporción 30:70 (agua: grano). Los tratamientos consistieron en: M1 (8°C), M2 (12°C) y M3 (16°C), con un tiempo de fermentación de 6 días (144 horas). Las condiciones de temperatura se controlaron en tanques de refrigeración (CENIFACÉ, 2015).

El diseño experimental con tres temperaturas controladas y un tiempo uniforme de fermentación permitió establecer condiciones comparables y evaluar de manera precisa los cambios físico-químicos en el grano.

4.3.5. Identificación de la región a analizar.

Se seleccionaron cinco granos de café por muestra para cada día de evaluación, con el objetivo de evitar alteraciones en la continuidad del análisis (Carvajal et al., 2011).

La selección de granos por cada día de muestreo aseguró la continuidad del experimento sin alterar la evolución natural del proceso fermentativo.

4.3.6. Obtener imágenes multiespectrales en el rango de 500-1000nm.

Se procedió a realizar la toma de capturas de las muestras a analizar que están en función al rango de 500 a 1000nm, para que el software procese y cree una imagen multiespectral que pueda ser visible las muestras en diferentes longitudes de onda (Baek, Lee, Kim, & Cho, 2015).

La captura en este rango de longitudes de onda facilitó la detección de cambios no perceptibles a simple vista, aportando objetividad al análisis del café.

4.3.7. Extraer perfil multiespectral.

Se capturó información diferentes espectros electromagnéticos para un mejor análisis comparativo de datos (Viera Maza G. I., 2018).

Este procedimiento permitió construir un perfil más completo del comportamiento del grano bajo diferentes condiciones, reforzando la utilidad de la espectroscopía como herramienta de control.

4.3.8. Análisis estadístico de la diferencia entre perfiles.

La información obtenida se procesó para evaluar la variabilidad entre los tratamientos de fermentación. Se utilizaron los softwares PixelWrench2, Matlab 2020 y Statgraphics Centurion 16.2 con el fin de determinar diferencias significativas entre los perfiles espectrales (Changhong, Yong, & Zude, 2014)

4.3.9. Secado

Posteriormente, los granos se secaron en bandejas con escurridores y bajo un secador solar a temperatura ambiente. Se realizaron seis volteos diarios hasta alcanzar un 10,5% de humedad, asegurando un almacenamiento adecuado sin deteriorar la calidad (CENIFACÉ, 2015).

Mantener el secado a temperatura ambiente permitió reproducir condiciones habituales en productores, generando resultados aplicables a la práctica cafetalera.

4.3.10. Trillado del café

El proceso de trillado permitió separar el pergamino del grano, obteniendo café verde o “café oro”, considerado el producto final del beneficio seco (CENIFACÉ, 2015).

Esta etapa fue clave para obtener café oro libre de pergamino, garantizando que la evaluación posterior se realizara en el producto final destinado al mercado.

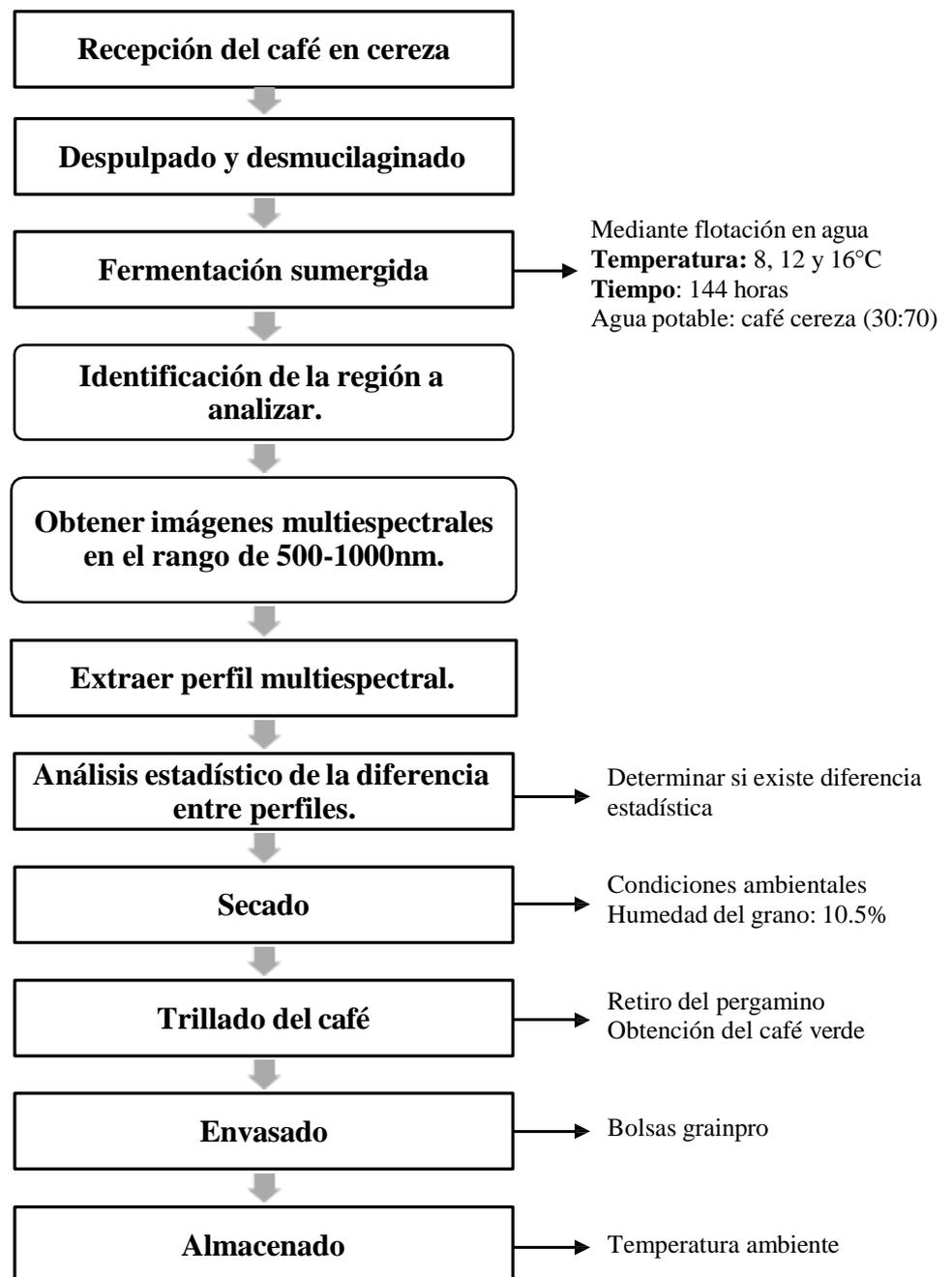
4.3.11. Envasado y almacenado

Una vez finalizada la operación anterior procedemos a envasar en bolsas herméticas y almacenar para evitar el contacto externo, la contaminación y humedecimiento de los granos (Puerta & Echevarry, J., 2015).

El envasado hermético constituyó una medida esencial para preservar las propiedades físicas y sensoriales del grano, asegurando la validez de los resultados hasta el análisis final.

4.4. Diagrama de flujo del beneficio de granos de café y evaluación de imágenes multiespectrales.

FIGURA 3. DIAGRAMA DE FLUJO DEL BENEFICIO DE GRANOS DE CAFÉ Y EVALUACIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES



4.5. Método de análisis

4.5.1. Obtención de muestras para investigación.

Esta investigación se realizó utilizando granos de café donde se presume que La temperatura del ambiente donde se desarrolla la fermentación controlada del café diferencia la proporción y tipo de aromas y sabores de la bebida, así como, las cantidades de sustancias volátiles del café tostado y del mucílago fermentado (CENIFACÉ, 2015).

Y del mismo modo, el tiempo de fermentación es la variable que el caficultor puede fijar dentro de un rango, para diferenciar la calidad de su café, de esta manera puede decidir según el sistema de fermentación, las características a acentuar en su café y darle valor agregado al producto (CENIFACÉ, 2015)

El diseño completamente al azar es el más simple y utilizado de todos. Es aplicable cuando las unidades experimentales son homogéneas y la administración del experimento es uniforme para todas ellas. Al concluir el experimento las unidades experimentales mostrarán diferentes resultados atribuibles en forma exclusiva a los tratamientos aplicados. (Gabriel J, Castro C, Valverde A, & Indachochea B, 2017)

Los resultados obtenidos se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) al 95% de nivel de significancia. Si hay una diferencia significativa ($P \leq 0,05$), se realiza la prueba multidominio de DUNCAN con un nivel de confianza del 95 %.

Variable independiente: Tiempo de fermentación sumergida de 6 días (144 horas), y temperaturas de fermentación sumergida (8°C, 12°C y 16°C) para los tres tratamientos (M1, M2, M3).

Variables dependientes: El CIE $L^*a^*b^*$ (CIELAB) es el modelo cromático usado normalmente para describir todos los colores que puede percibir el ojo humano.

4.6. Unidad de análisis (población y muestra)

4.6.1. Unidad de análisis

Son los granos de café de la variedad Catimor en cerezo, obtenidos de la provincia de San Ignacio, región Cajamarca, tomando en cuenta la calidad de cosecha para una adecuada evaluación y beneficio del grano de café.

4.6.2. Población

Son los granos de café de la variedad Catimor en cerezo, obtenidos de la provincia de San Ignacio

4.6.3. Muestra

Se obtendrán 3 muestras de café en la variedad Catimor, estando sometidos a tres temperaturas (M1= 8°C, M2= 12°C y M3=16 °C)

4.7. Diseño de investigación

4.7.1. Perfiles y firmas espectrales

Los perfiles espectrales se registraron utilizando el sistema multiespectral diseñado. Calibrado con una cámara de reflexión óptica multiespectral (Tetracam ADC Micro). La cámara consta de un módulo Vis-NIR con una sensibilidad aproximada de 520 nm a 920 nm conectado a una fuente de luz de diodo emisor de luz (LED) tribanda verde, roja y NIR (equivalente a Landsat TM2, TM3, TM4). Las imágenes multiespectrales adquiridas se procesaron y analizaron, las firmas espectrales se graficaron con el software Matlab 20 y se clasificaron los espectros adquiridos de muestras en cuatro tratamientos de temperatura (A, AE, R, C). Para la captura de los perfiles espectrales se utilizó el sistema multiespectral que se había diseñado; acondicionado con la cámara multiespectral de reflectancia óptica (Tetracam ADC Micro). Esta cámara comprende un módulo Vis - NIR, con sensibilidad aproximada entre 520 nm a 920 nm, acoplada a una fuente de diodos emisores

de luz (LED) con tres bandas: Verde, Rojo y NIR (Equivalente a Landsat TM2, TM3, TM4). Todas las imágenes multiespectrales adquiridas se procesaron, analizaron y se hizo la representación gráfica de las firmas espectrales con el Software Matlab 20 con el fin de ordenar los espectros tomados de las muestras en los tres tratamientos de temperatura (M1, M2, M3).

Para realizar el cálculo con operaciones con vectores y matrices usamos el software Matlab, que, con su propio lenguaje de programación y cálculos técnicos obtuvimos los resultados para los análisis multivariados PCA y PLS.

Statgraphics Centurión, fue el programa que se usó, con el fin de analizar la varianza (ANOVA) y visualizar la diferencias significativamente entre pares de medias de reflectancia de los tres tratamientos por los 6 días.

El CIE $L^*a^*b^*$ (CIELAB) es el modelo cromático usado normalmente para describir todos los colores que puede percibir el ojo humano. Los datos obtenidos de la Luminosidad (L^*), la coordenada a^* y coordenada b^* fueron obtenidos mediante el Colorímetro Konica Minolta de las tres muestras en cada evaluación de los perfiles multiespectrales.

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1. Efecto del tiempo y temperatura de fermentación de café variedad Catimor mediante el uso de imágenes espectrales.

En la Tabla 3 podemos observar las imágenes multiespectrales y los histogramas de las tres muestras de granos de café en fermentación sumergida en sus correspondientes tratamientos de temperatura: M1= 8°C, M2= 12°C y M3= 16°C; durante los 6 días evaluados. Estos resultados presentados fueron captados por el sistema multiespectral que fue producto del diseño descrito anteriormente, con el sensor de la cámara TetraCam donde podemos observar la medición y registro múltiple de las bandas de longitud de onda del espectro electromagnético en un área determinada.

Además de ello, representamos en la Tabla 4, las firmas espectrales de los granos de café en fermentación sumergida de acuerdo a cada tratamiento según temperatura M1, M2 y M3; las cuales fueron evaluados durante 6 días, plasmadas a partir de las mediciones de reflectancia del sistema multiespectral a base de cámara TetraCam, las mismas que fueron procesadas por el Software Matlab 20, donde se observan que los cambios diarios de reflectancia para los 3 tratamientos de temperatura observando las bandas de diferencia según la temperatura y tiempo.

TABLA 3. IMÁGENES MULTIESPECTRALES DE LOS 3 TRATAMIENTOS DE T° ANALIZADOS DURANTE LOS 6 DÍAS.

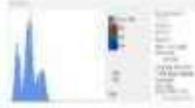
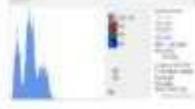
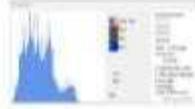
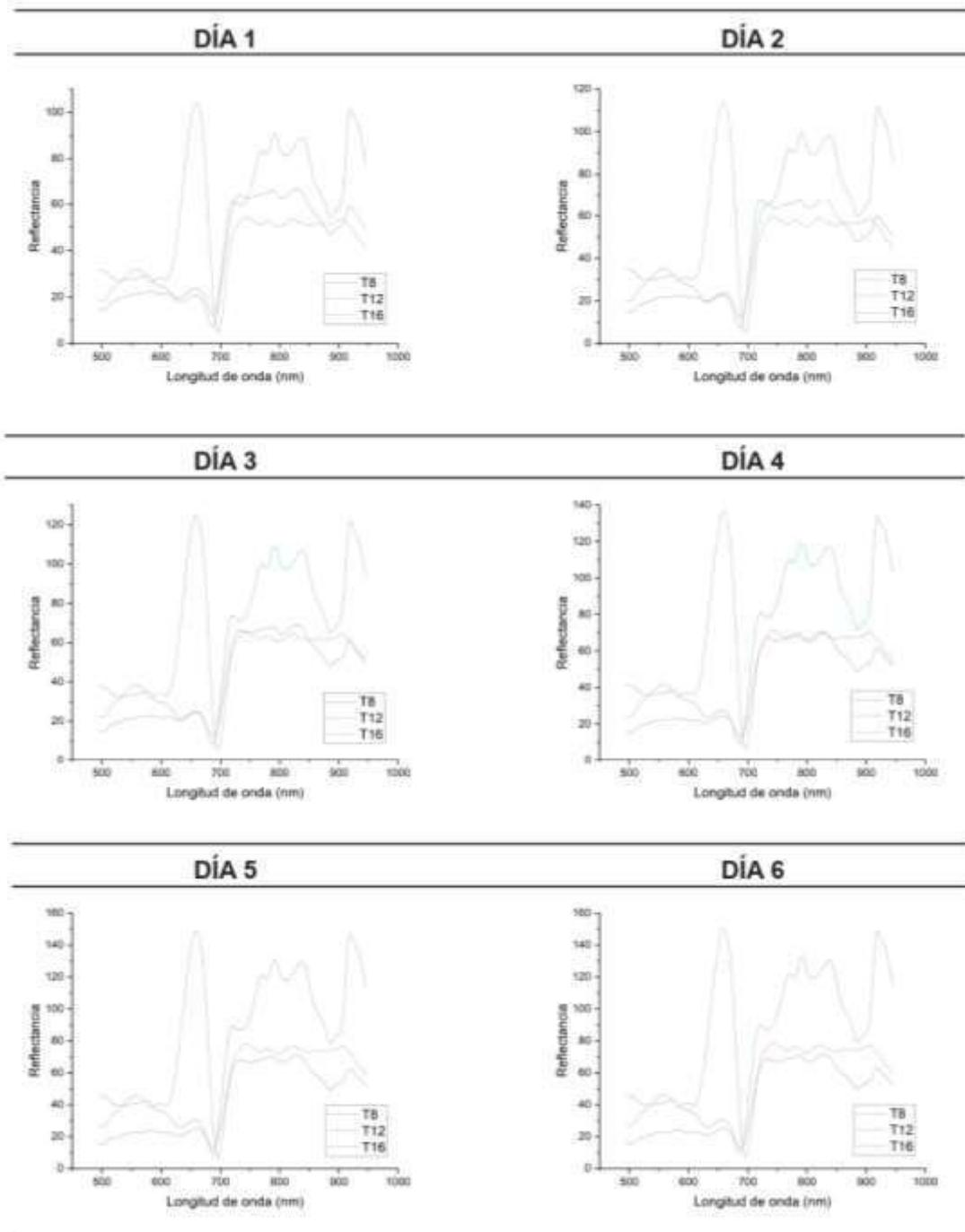
	DÍA 1		DÍA 2		DÍA 3	
	Imagen Multiespectral	Histograma	Imagen Multiespectral	Histograma	Imagen Multiespectral	Histograma
	M1					
M2						
M3						
	DÍA 4		DÍA 5		DÍA 6	
	Imagen Multiespectral	Histograma	Imagen Multiespectral	Histograma	Imagen Multiespectral	Histograma
	M1					
M2						
M3						

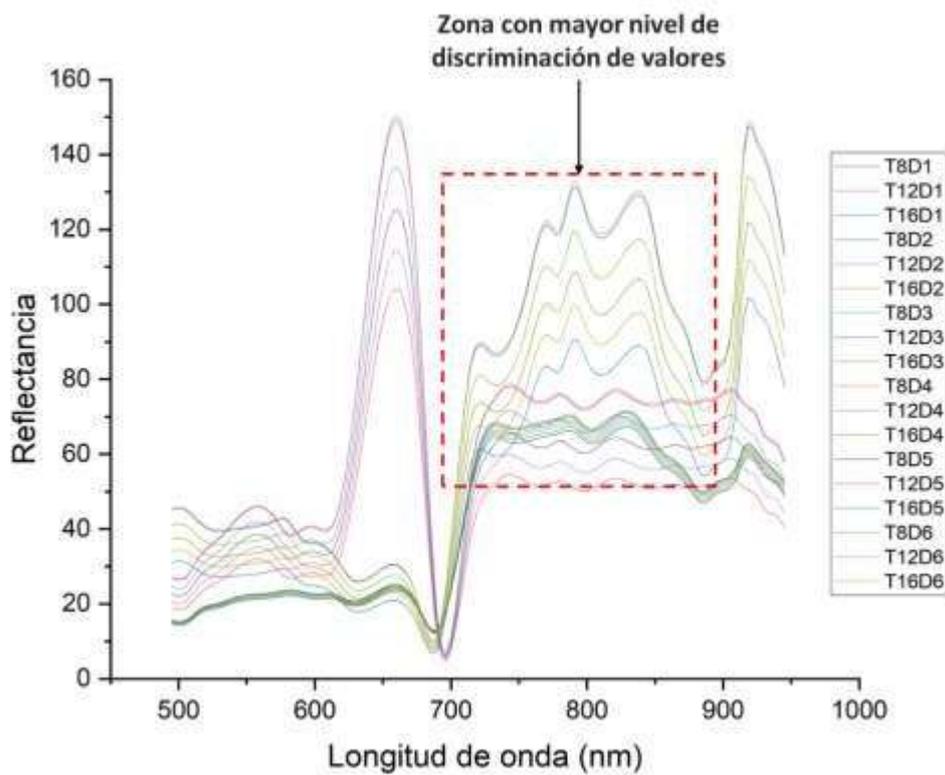
TABLA 4. FIRMAS ESPECTRALES DE LOS 3 TRATAMIENTOS DE TEMPERATURA EN CADA DÍA



5.1.1. Caracterización con mayor discriminación multispectral promedio.

En la Figura N° 4 se muestra la longitud de onda promedio durante los 6 días de evaluación para los tres tratamientos de temperatura en las muestras de fermentación sumergida de café. Para realizar el análisis se usó el nivel de distinción de la zona con mayor nivel de discriminación de valores entre 750nm y 850 nm del espectro electromagnético donde el objetivo es encontrar una mejor diferencia de las longitudes de ondas para realizar el análisis; dichos valores pertenecen a la región del espectro de luz visible e ingresando al espectro IR, predominando los colores naranjas y rojos, coincidiendo con el color de la fermentación del café por sus tonos rojizos.

FIGURA 4. DIAGRAMA DE LOCALIZACIÓN DE LA ZONA CON MAYOR NIVEL DE DISCRIMINACIÓN MULTIESPECTRAL

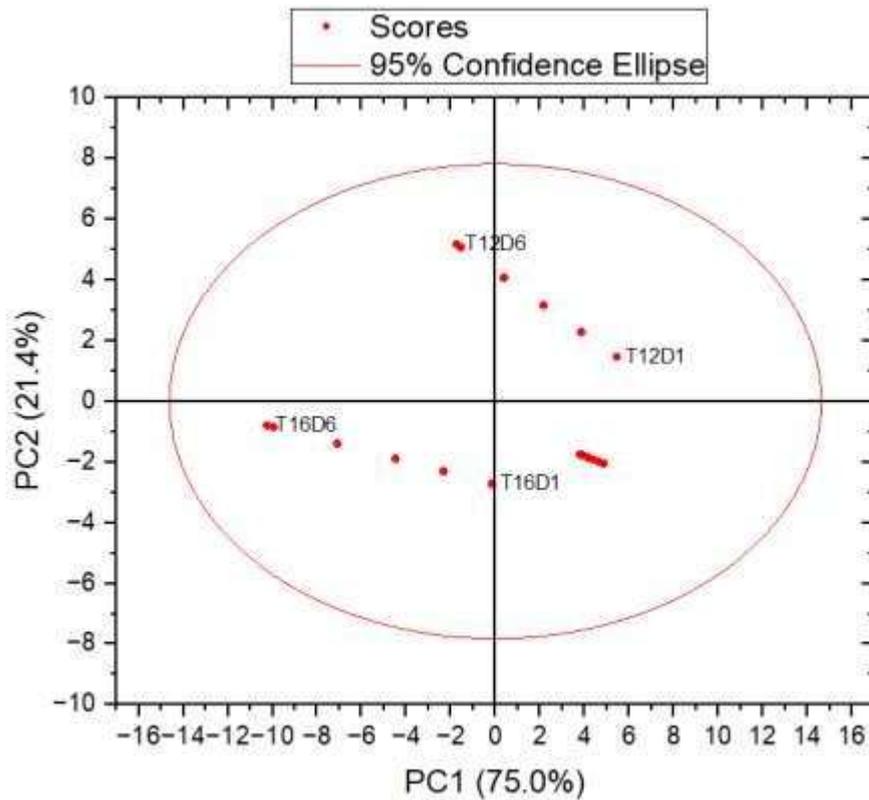


5.1.2. Análisis de los espectros del proceso de fermentación

Para verificar la posibilidad de distinción de la calidad de fermentación del café, se analizaron los espectros de las 18 muestras analizadas (6 días por cada temperatura) mediante un Análisis de Componentes Principales (PCA).

Un modelo global de PCA evaluó todas las muestras y reveló distinciones según su temperatura y día de fermentación. Los dos primeros PC que explican, respectivamente, 75.0 % y 21.4 % de varianza se extrajeron en este modelo. Estos valores distinguieron las muestras de una manera adecuada, los valores se muestran en la Figura 5.

FIGURA 5. ANÁLISIS DE PCA DE CAFÉS

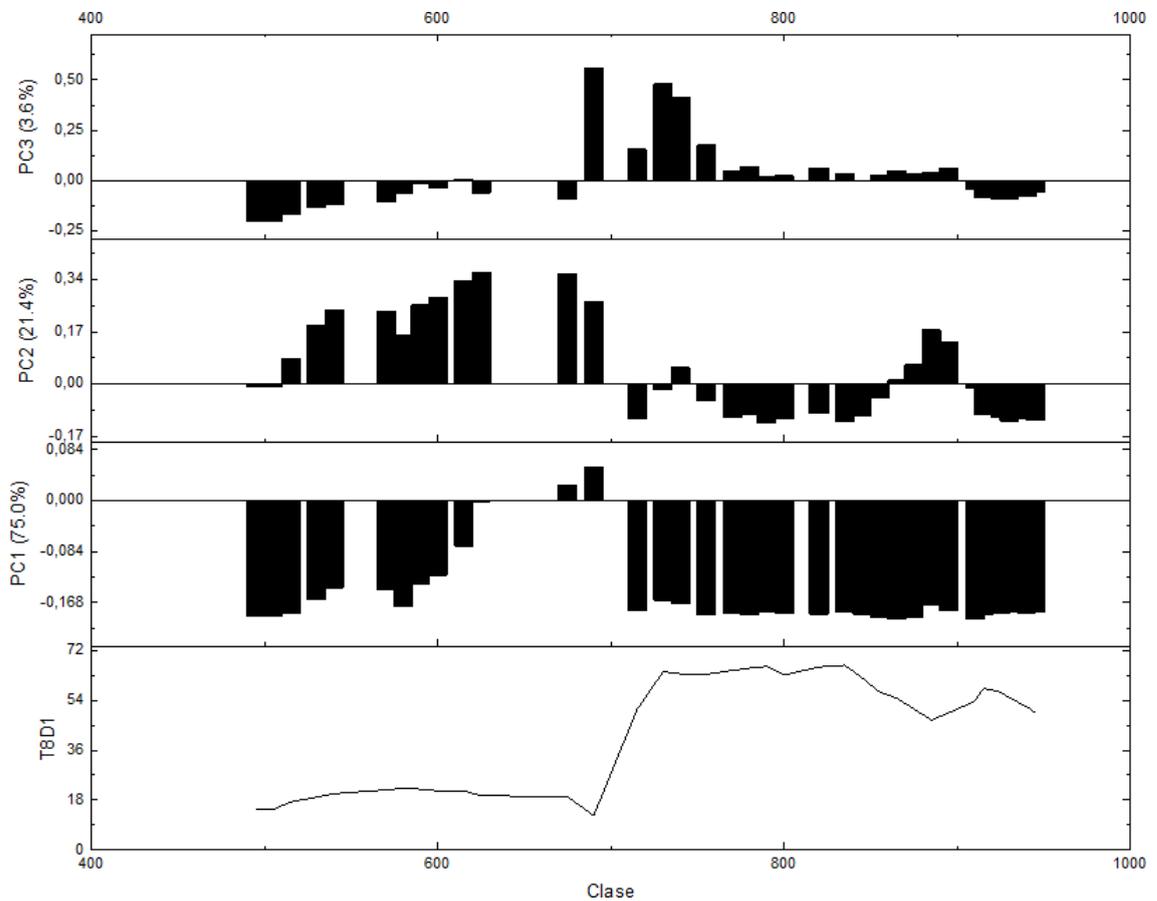


Tal como se observa en la Figura 5, cada punto rojo representa los valores del espectro obtenido en el proceso de fermentación, esto demuestra que cada etapa del proceso se puede caracterizar y diferenciar exitosamente usando imágenes espectrales. Existen trabajos similares en café que muestran el éxito

de usar sistemas espectrales en este campo de estudio como el que reporta Baqueta et al., (2023) en variedades como Robusta, Conilon y Arábica.

El análisis completo para la discriminación arroja un valor de PC1:75.0 %, PC2: 21.4 % y PC3:3.6 %, lo cual se muestra en la figura 6, tal como se observa el componente principal 3 (PC3) tiene muy poca información por lo que incluirlo en el modelo de análisis no genera un mayor cambio en el nivel de discriminación del modelo PCA. De acuerdo con el modelo usado el nivel de precisión encontrado es de 88.45 %.

FIGURA 6. PCA COMPLETO



La información que se halló en el análisis de los granos de café fermentado y el posterior análisis es de suma importancia para lograr aplicaciones futuras de monitoreo del proceso de café, sobre todo en la fase de fermentación. Tal como comenta Zhu et al., (2021) la principal dificultad del uso de imágenes espectrales con análisis multivariado como PCA es la posible información no

útil contenida en los datos espectrales, que podría deteriorar la calidad de los modelos usados, en nuestro caso la decisión de usar solo una parte del espectro generó resultados con un mayor nivel de clasificación. El uso de tecnología espectrales en café ha sido muy estudiado debido a la importancia comercial de este producto, tal es el caso de café de origen brasileño (de Araújo et al., 2021) o como en el estudio de Sim et al., (2023) que realiza un estudio con tecnologías espectrales a cafés de varias partes del mundo para verificar su origen.

5.2. Análisis del espacio de Color CIE L*a*b* debido al efecto del Tiempo y la Temperatura.

5.2.1. Efecto de la temperatura y tiempo sobre parámetro L*.

En la Tabla N° 5, el análisis ANOVA muestra los efectos del Tiempo (A) y la Temperatura (B) sobre los granos de café analizados. Las variables tiempo y temperatura presentaron valores de $p < 0.05$, indicando un efecto significativo en la variación del valor de la luminosidad (L*)

TABLA 5. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA L*

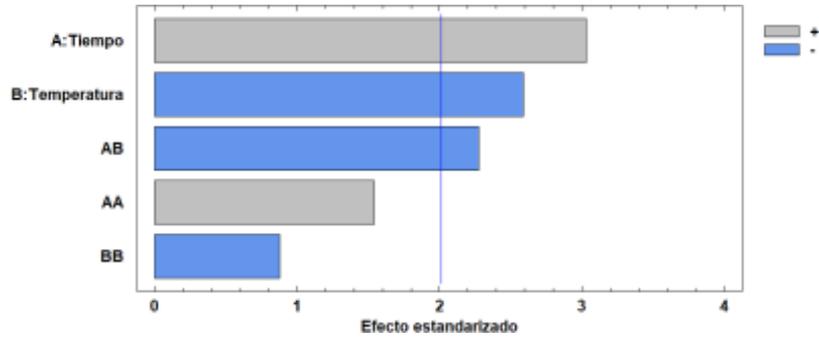
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Tiempo	44.4646	1	44.4646	9.16	0.0040
B:Temperatura	32.566	1	32.566	6.71	0.0128
AA	11.5181	1	11.5181	2.37	0.1303
AB	25.1615	1	25.1615	5.18	0.0275
BB	3.7632	1	3.7632	0.78	0.3832
bloques	5.84261	2	2.9213	0.60	0.5521
Error total	223.31	46	4.85456		
Total (corr.)	346.626	53			

El ANOVA indica que si hay diferencia significativa de acuerdo al Tiempo y la Temperatura con el valor de $p < 0.05$.

En la Figura N° 7, el Diagrama de Pareto muestra los efectos estandarizados de las variables independientes (Tiempo y Temperatura) y sus interacciones sobre la variable dependiente, que en este caso es la luminosidad (L*). Los efectos estandarizados se presentan en forma de barras horizontales, donde cada barra representa un factor o interacción de factores, y su longitud indica la magnitud del efecto estandarizado.

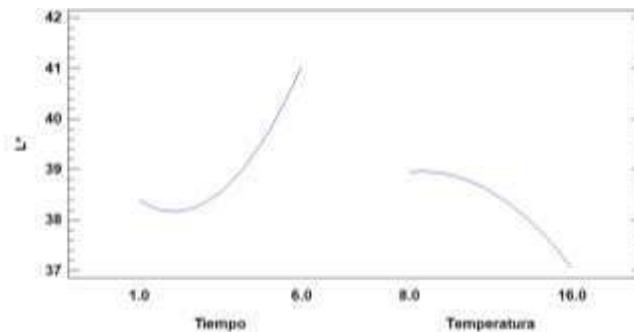
Indicándonos que el Tiempo (A) y la Temperatura (B) son los factores con el efecto significativo sobre el la variación del valor de la luminosidad (L*).

FIGURA 7. DIAGRAMA DE PARETO PARA DIFERENCIACIÓN ENTRE TIEMPO Y TEMPERATURA RESPECTO A L*



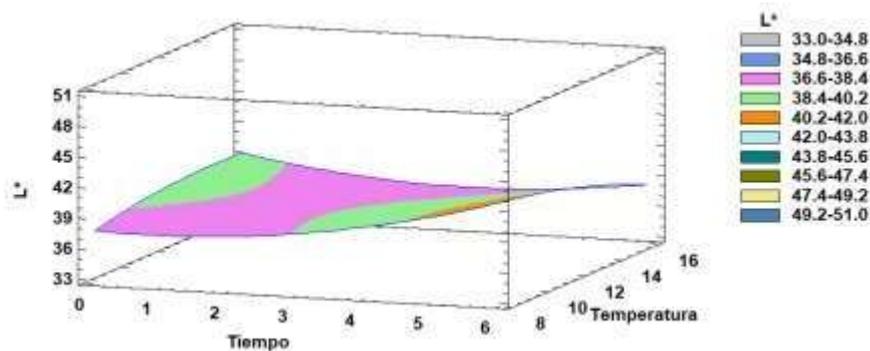
En la figura siguiente, se presenta el efecto del parámetro L* en función de cada variable, tanto el tiempo como la temperatura. Se observa que el valor de L* incrementa conforme aumenta el tiempo, esto sugiere que los granos de café se vuelven más luminosos con un mayor tiempo de fermentación. En contraste, al incrementarse la temperatura, el valor de L* disminuye, esto indica que, a mayores temperaturas, los granos de café tienden a ser menos luminosos.

FIGURA 8. DIAGRAMA DE EFECTO DE LA L* RESPECTO A CADA VARIABLES SEGÚN EL TIEMPO Y LA TEMPERATURA



La Figura N° 9 muestra una representación tridimensional de la superficie de respuesta, donde el eje X representa el tiempo, el eje Y la temperatura y el eje Z la luminosidad L*. Los diferentes colores en la gráfica indican distintos niveles de L* y se observa que la luminosidad (L*) varía significativamente con el tiempo y la temperatura; los valores más altos de L* se alcanzan con temperaturas moderadas y tiempos de fermentación específicos, mostrando un punto óptimo donde la luminosidad es máxima. La interacción entre el tiempo y la temperatura también influye en la respuesta, como se evidencia en la curvatura de la superficie, la metodología de superficie de respuesta permite identificar las condiciones óptimas de tiempo y temperatura que maximizan la luminosidad (L*) de los granos de café durante la fermentación.

FIGURA 9. REPRESENTACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DE L*.



$$L^* = 31.6351 + 0.703863 * \text{Tiempo} + 1.03056 * \text{Temperatura} + 0.185149 * \text{Tiempo}^2 - 0.122381 * \text{Tiempo} * \text{Temperatura} - 0.035 * \text{Temperatura}^2$$

$$R^2 = 0.89$$

La ecuación obtenida y la gráfica tridimensional proporcionan una herramienta útil para predecir y controlar el proceso de fermentación, optimizando la calidad del producto final

5.2.2. Efecto de la temperatura y tiempo sobre parámetro a*.

Las coordenadas de color, particularmente las coordenadas rojo-verde (a*), son cruciales para evaluar los cambios en la calidad y las características del café durante la fermentación.

En la Tabla N° 6, el análisis de varianza (ANOVA) revela los efectos del Tiempo (A) y la Temperatura (B) sobre los granos de café analizados. Los resultados indican que el factor Tiempo presentó valores de $p < 0.05$, sugiriendo que solo esta variable tuvo un efecto significativo en la variación del valor de las coordenadas rojo/verde (a*).

TABLA 6. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA a*

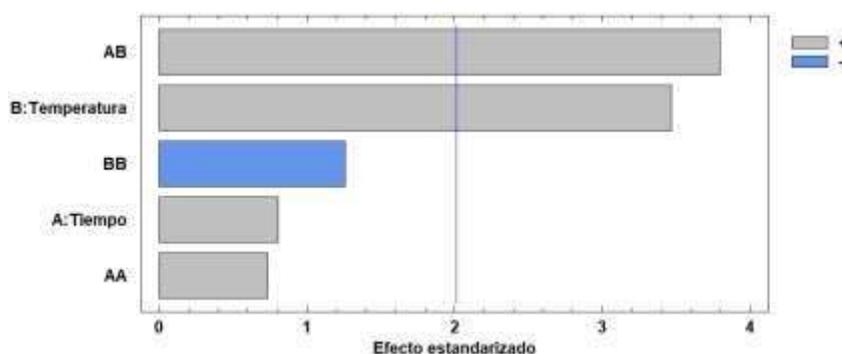
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Tiempo	1.04962	1	1.04962	0.65	0.4246
B:Temperatura	19.404	1	19.404	12.00	0.0012
AA	0.876386	1	0.876386	0.54	0.4653
AB	23.2792	1	23.2792	14.40	0.0004
BB	2.56688	1	2.56688	1.59	0.2140
bloques	2.84648	2	1.42324	0.88	0.4216
Error total	74.378	46	1.61691		
Total (corr.)	124.401	53			

En la Figura N° 10, el Diagrama de Pareto muestra los efectos estandarizados de las variables independientes (Tiempo y Temperatura) y sus interacciones sobre la variable dependiente, que en este caso son las coordenadas rojo/verde (a*).

Los efectos estandarizados se presentan en forma de barras horizontales, donde cada barra representa un factor o interacción de factores, y su longitud indica la magnitud del efecto estandarizado.

Indicándonos que la Temperatura (B) es el factor con el efecto significativo sobre el la variación del valor de las coordenadas rojo/verde (a*).

FIGURA 10. DIAGRAMA DE PARETO PARA DIFERENCIACIÓN ENTRE TIEMPO Y TEMPERATURA RESPECTO a a*

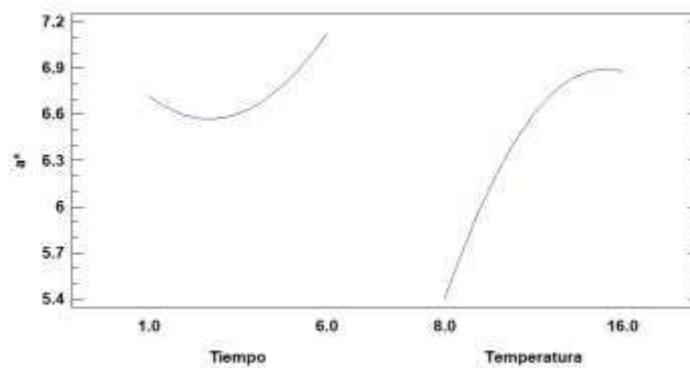


En la siguiente figura, se presenta el efecto del parámetro a^* en relación con las variables, tanto el tiempo como la temperatura, durante el proceso de fermentación sumergida del café.

Se observa que el valor de a^* muestra una tendencia no lineal donde los valores de a^* inicialmente disminuyen ligeramente y luego aumentan, indicando cambios en el color del café durante las primeras horas de fermentación.

Del mismo modo, con el aumento de la temperatura exhibe un incremento más pronunciado de los valores de a^* , sugiriendo una correlación positiva entre la temperatura y la intensidad del color rojo-verde en el café.

FIGURA 11. DIAGRAMA DE EFECTO a^* RESPECTO A CADA VARIABLES SEGÚN EL TIEMPO Y LA TEMPERATURA



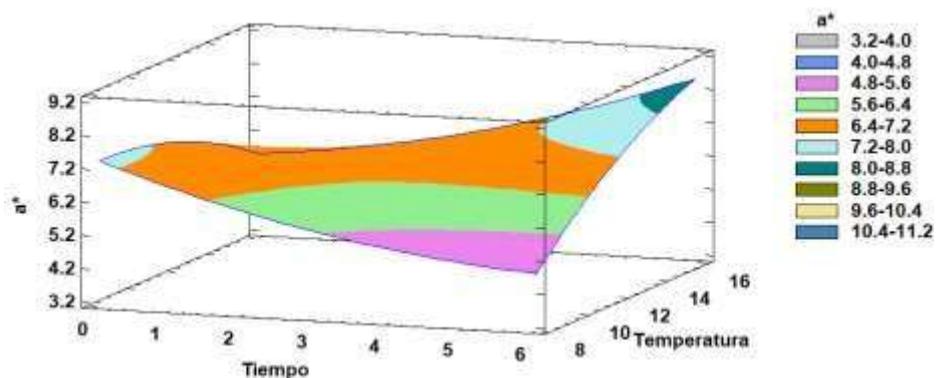
La Figura N° 12 nos ofrece una representación tridimensional de la superficie de respuesta de las coordenadas rojo-verde (a^*), permitiendo visualizar cómo estas cambian con respecto al tiempo y la temperatura.

El gráfico tridimensional permite observar cómo las coordenadas de color a^* varían en función del Tiempo y la Temperatura durante la fermentación sumergida. A medida que el tiempo de fermentación avanza, se observa una tendencia a la variación de los valores de a^* , reflejando los cambios en la composición y color del café. Y con el aumento de la temperatura, los valores de a^* también muestran cambios significativos, indicando una relación directa entre la temperatura y la intensidad del color rojo-verde.

La representación tridimensional de la superficie de respuesta de a^* es una herramienta valiosa para entender la dinámica del proceso de fermentación del café. Esta visualización ayuda a identificar las condiciones óptimas de tiempo y temperatura para obtener las características deseadas en el producto final. La información derivada de este análisis puede ser utilizada para ajustar y controlar el proceso de fermentación, mejorando la calidad del café de la variedad Catimor.

El gráfico de la Figura N° 12 destaca la importancia de un monitoreo preciso y detallado durante la fermentación, utilizando tecnologías avanzadas como las imágenes espectrales, para asegurar un producto de alta calidad que cumpla con los estándares de color y sabor esperados.

FIGURA 12. REPRESENTACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DE a^*



$$a^* = 5.52411 - 1.68844 * \text{Tiempo} + 0.465292 * \text{Temperatura} + 0.0510714 * \text{Tiempo}^2 + 0.117714 * \text{Tiempo} * \text{Temperatura} - 0.0289062 * \text{Temperatura}^2.$$

$R^2=0.91$

La ecuación que relaciona a^* con el tiempo y la temperatura es un resultado significativo de la aplicación de modelos de regresión en el estudio del proceso de fermentación del café. Al ofrecer una comprensión detallada de cómo estas variables afectan las coordenadas de color, y nos sirve como una herramienta fundamental para la optimización y el control del proceso de fermentación, asegurando que el café de la variedad Catimor alcance las características deseadas de calidad y sabor.

5.2.3. Efecto de la temperatura y tiempo sobre parámetro b*.

En la Tabla N° 7, el análisis de varianza (ANOVA) revela los efectos del Tiempo (A) y la Temperatura (B) sobre los granos de café en fermentación sumergida analizados. Los resultados indican que ningún factor presentó valores de $p < 0.05$, sugiriendo que no hubo un efecto significativo en la variación del valor de las coordenadas amarillo/azul (b*).

TABLA 7. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA b*

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Tiempo	0.0114859	1	0.0114859	0.01	0.9175
B:Temperatura	0.0367361	1	0.0367361	0.03	0.8530
AA	12.1626	1	12.1626	11.49	0.0014
AB	0.143006	1	0.143006	0.14	0.7149
BB	3.37433	1	3.37433	3.19	0.0808
bloques	0.227012	2	0.113506	0.11	0.8985
Error total	48.6846	46	1.05836		
Total (corr.)	64.6397	53			

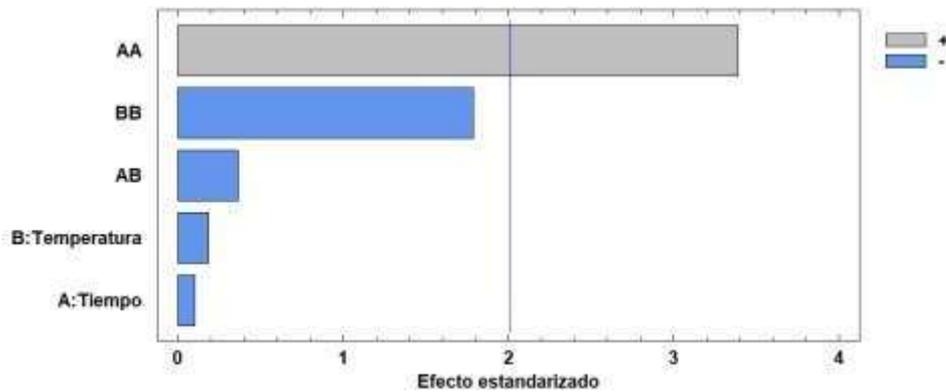
En la Figura N° 13, el Diagrama de Pareto muestra los efectos estandarizados de las variables independientes (Tiempo y Temperatura) y sus interacciones sobre la variable dependiente, que en este caso son las coordenadas amarillo/azul (b*).

Los efectos estandarizados se presentan en forma de barras horizontales, donde cada barra representa un factor o interacción de factores, y su longitud indica la magnitud del efecto estandarizado.

Este diagrama refuerza los hallazgos del análisis de varianza, mostrando que ni el tiempo, ni la temperatura, ni sus interacciones tienen un efecto estandarizado significativo sobre las coordenadas amarillo/azul (b*).

Esto sugiere que las variaciones observadas en b* durante el proceso de fermentación sumergida del café de la variedad Catimor no pueden atribuirse significativamente a estas variables dentro del rango estudiado.

FIGURA 13. DIAGRAMA DE PARETO PARA DIFERENCIACIÓN ENTRE TIEMPO Y TEMPERATURA RESPECTO A b^*



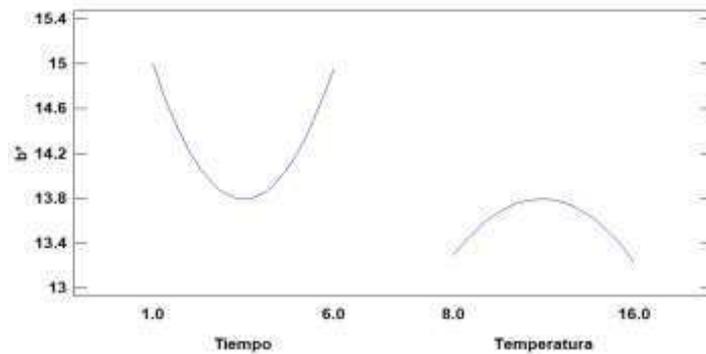
En la siguiente figura, se presenta el efecto del parámetro b^* en relación con las variables, tanto el tiempo como la temperatura, durante el proceso de fermentación sumergida del café.

El parámetro b^* , que representa la coordenada de color amarillo/azul, es una variable crucial para entender las características cromáticas del café durante su proceso de fermentación sumergida.

Aunque inicialmente se podría esperar que el tiempo de fermentación influya en la variación de b^* , los resultados del análisis de varianza indican que los cambios en el tiempo no tienen un efecto significativo en esta coordenada de color. Esto sugiere que el parámetro b^* se mantiene relativamente constante a lo largo del tiempo de fermentación, independientemente de su duración.

Similar al tiempo, la temperatura durante la fermentación también se ha evaluado para determinar su impacto en b^* . Los hallazgos muestran que las variaciones en la temperatura no resultan en cambios significativos en el valor de b^* . Esto implica que el rango de temperaturas aplicado durante el proceso de fermentación no afecta significativamente la coordenada amarilla/azul del color del café.

FIGURA 14. DIAGRAMA DE EFECTO DE b^* RESPECTO A CADA VARIABLE SEGÚN EL TIEMPO Y LA TEMPERATURA.

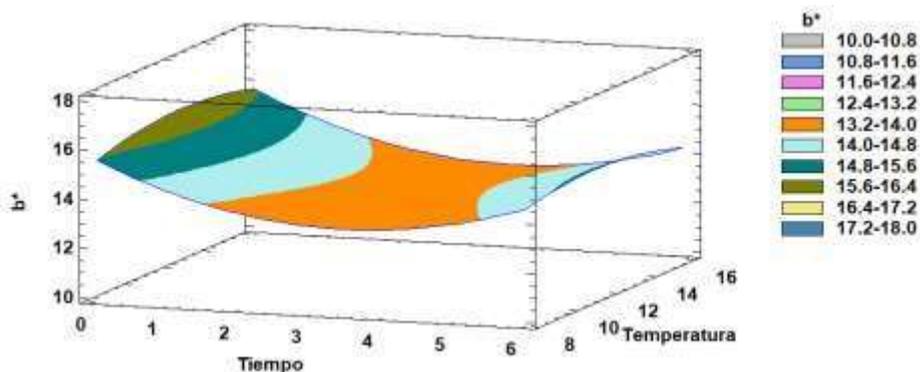


La Figura N° 15 nos ofrece una representación tridimensional de la superficie de respuesta de las coordenadas amarillo - azul (b^*), permitiendo visualizar cómo estas cambian con respecto al tiempo y la temperatura.

Según se puede observar el gráfico tridimensional no son atribuibles de manera significativa ni al tiempo ni a la temperatura dentro del rango estudiado. Esto implica que las variaciones observadas son menores y no suficientemente impactantes para ser consideradas estadísticamente significativas.

El gráfico destaca la importancia de un monitoreo preciso y detallado durante la fermentación, utilizando tecnologías avanzadas como las imágenes espectrales, para asegurar un producto de alta calidad que cumpla con los estándares de color y sabor esperados.

FIGURA 15. REPRESENTACIÓN TRIDIMENSIONAL DE LA SUPERFICIE DE RESPUESTA DE b^*



$$b^* = 11.0881 - 1.22963 * \text{Tiempo} + 0.819722 * \text{Temperatura} + 0.190258 * \text{Tiempo}^2 - 0.00922619 * \text{Tiempo} * \text{Temperatura} - 0.0331424 * \text{Temperatura}^2$$

$R^2=0.915$

La ecuación que relaciona b^* con el tiempo y la temperatura es un resultado que no expresa un nivel significativo de la aplicación de modelos de regresión en el estudio del proceso de fermentación del café.

El análisis de los datos obtenidos a través de la aplicación de imágenes espectrales durante el proceso de fermentación sumergida del café de la variedad Catimor permitió identificar varias tendencias significativas en las características cromáticas de los granos de café.

Se observó que la temperatura tiene un efecto significativo en la variación de las coordenadas rojo/verde (a^*), mientras que el tiempo de fermentación muestra una tendencia no lineal. Inicialmente, los valores de a^* disminuyen ligeramente y luego aumentan, lo cual indica cambios en el color del café durante las primeras horas de fermentación. Con el incremento de la temperatura, los valores de a^* también aumentan, sugiriendo una correlación positiva entre la temperatura y la intensidad del color rojo-verde en el café.

En cuanto a las coordenadas amarillo/azul (b^*), tanto el tiempo como la temperatura no mostraron un efecto estandarizado significativo. Esto implica que las variaciones observadas en b^* durante el proceso de fermentación sumergida del café no pueden atribuirse significativamente a estas variables dentro del rango estudiado.

Tal como menciona Revelo-Romo et al., (2025), la fermentación del café es iniciada por comunidades microbianas naturalmente presentes en o dentro de la cereza del café, o por aquellas que colonizan los granos durante el procesamiento, originarias de ambientes externos y están afectadas por las condiciones externas, donde la temperatura es un valor crítico en su procesamiento, por este motivo el estudio de las variables de temperatura y tiempo en el proceso de fermentado es importante para poder controlar su efecto sobre la calidad posterior del café como es el color, a este concepto Zhang et al., (2019) menciona que durante el procesamiento húmedo como

la fermentación genera perfiles precursores de sabor distintos de los granos de café verde, así como su apariencia general.

5.3. Relación entre imágenes espectrales y espacio de color CIELAB

Con el objetivo de relacionar los espectros obtenidos y el color en cada etapa del proceso de fermentación se realizó una regresión en base al modelo de mínimos cuadrados parciales (PLS: del inglés *Partielle kleinste Quadrate*).

La Figura 16, Figura 17 y Figura 18 muestran que el nivel de predicción del color en base a valores espectrales está en un nivel aceptable, esto porque el gráfico de valores predichos-valores reales indica que el modelo se ajusta bien al primer componente, además en el gráfico de valores residuales predichos, los residuos se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero.

Esto indica que no hay deriva en el proceso. El gráfico PP de los residuos se puede utilizar para comprobar si la varianza se distribuye normalmente. El resultado cae prácticamente en una línea, lo que significa que la varianza se distribuye normalmente.

La Tabla 8 muestra la varianza explicada del modelo PLS, donde se observa que hay un nivel de explicación de 99.3% para los valores espectrales usados.

TABLA 8. VARIANZA EXPLICADA DEL MODELO PLS

Variable	Varianza	Varianza X acumulada (%)	Varianza	Varianza Y acumulada (%)
	explicada para los efectos X (%)		explicada para las respuestas Y (%)	
L*, a* y b*	99,33835	99,33835	25,61103	25,61103

FIGURA 16. PLS PARA VARIABLE L

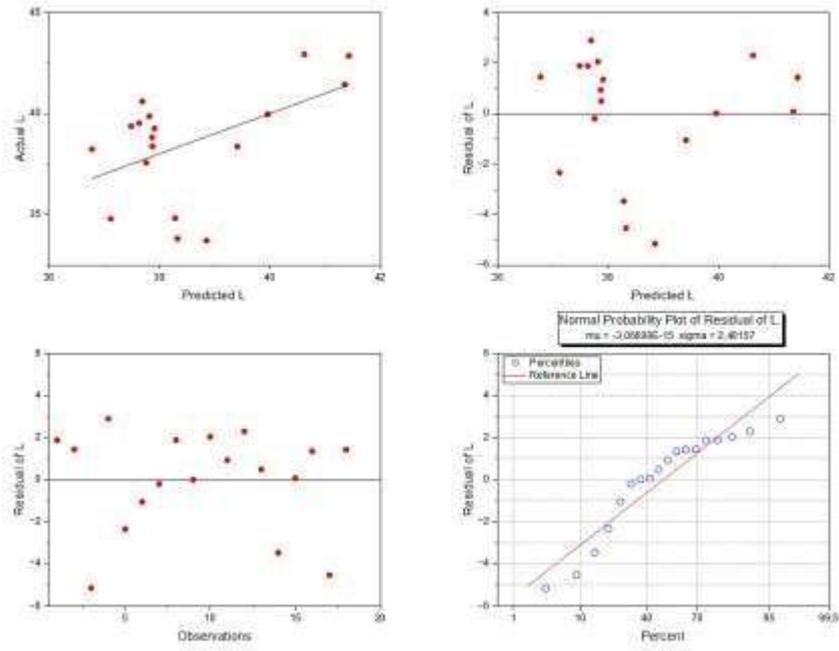


FIGURA 17. PLS PARA VARIABLE a*

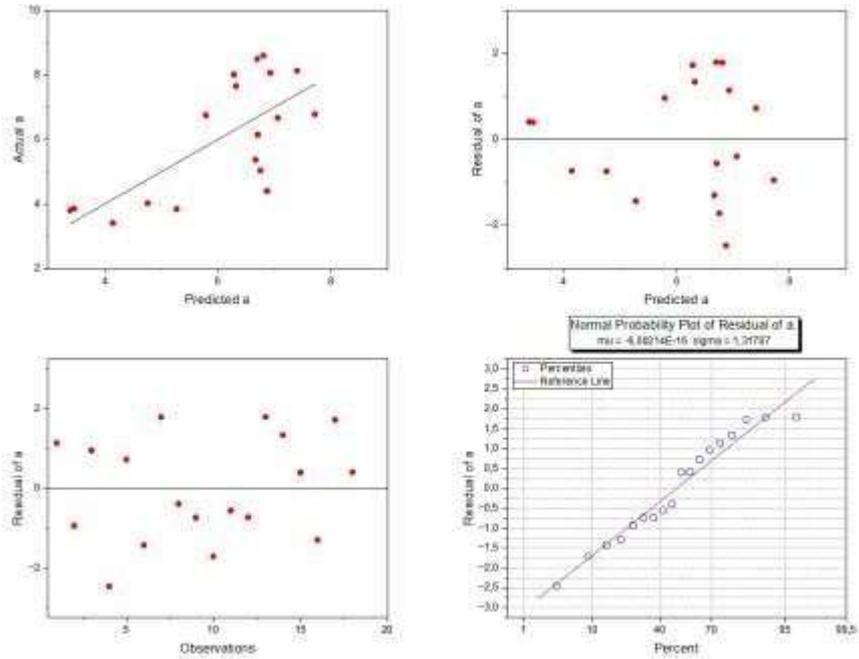
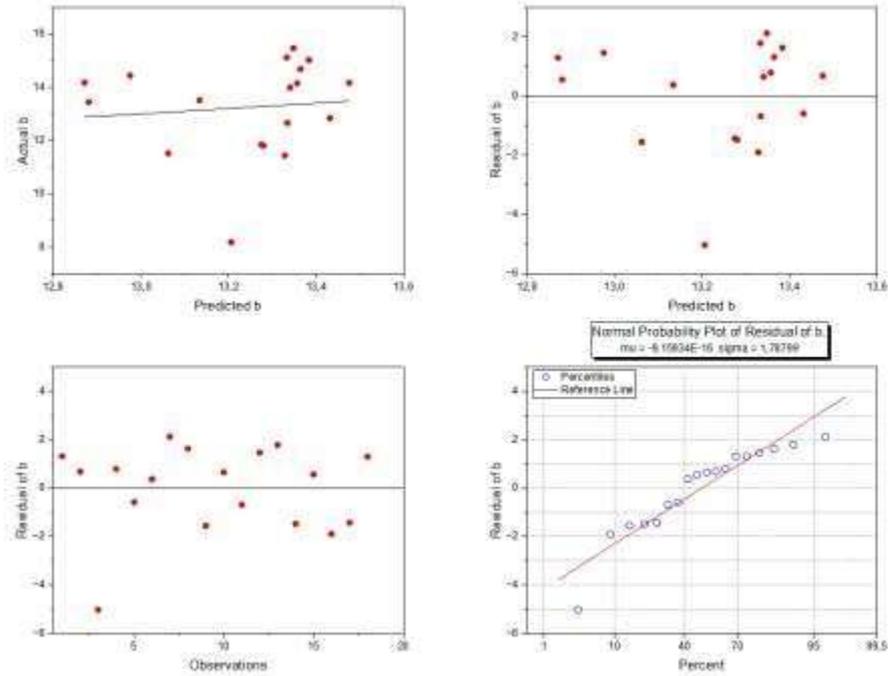
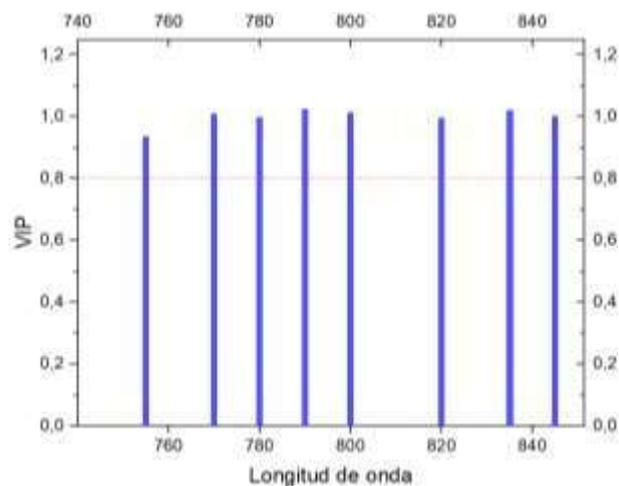


FIGURA 18. PLS PARA VARIABLE b*



Finalmente, en la Figura 19 mostramos un gráfico VIP (Variable Importance Plot) la cual es una herramienta visual utilizada en el contexto del aprendizaje automático para comprender qué variables son más importantes en un modelo predictivo. Todos los valores que superan la línea roja son de importancia para el modelo de predicción y relación entre el espectro y el espacio CIELAB de los granos de café. Tal como se observa el rango escogido al analizar entre 750nm y 850 nm resulta de suma importancia y son las más influyentes en las predicciones del modelo.

FIGURA 19. VIP DE DATOS ESPECTRALES



VI. CONCLUSIONES

- Se logró la clasificación de muestras de café Catimor en diferentes tiempos y temperaturas mediante imágenes espectrales, alcanzando una precisión del 88.45 % con el modelo PCA (PC1 = 75.0 %, PC2 = 21.4 %). Esto confirma la capacidad de la espectroscopía para distinguir estados de fermentación, aportando una herramienta objetiva frente a la evaluación empírica tradicional.
- El análisis de varianza evidenció que el tiempo y la temperatura ejercieron efectos diferenciados sobre el color del café: en la coordenada L* se observó que el tiempo incrementó la luminosidad mientras que la temperatura la redujo; en la coordenada a*, la temperatura provocó un aumento en los tonos rojizos, mostrando un efecto significativo ($p < 0.05$); mientras que en la coordenada b* no se hallaron efectos significativos, manteniéndose estable durante todo el proceso de fermentación. Estos resultados confirman que las variables cromáticas responden de manera distinta a las condiciones del proceso, siendo L* y a* más sensibles a las variaciones de tiempo y temperatura que b*.
- Se estableció la relación entre imágenes espectrales y el espacio CIELAB mediante el modelo PLS, con un nivel de explicación del 99.3 %. El rango entre 750–850 nm fue el más influyente en la predicción del color, lo que refuerza la aplicabilidad de esta tecnología para el monitoreo y control del proceso de fermentación, asegurando mayor precisión en la determinación de atributos de calidad del café.

VII. RECOMENDACIONES

- Es importante incluir modelos de clasificación de café más actuales como pueden ser Support Vector Machine o Random Forest que son actualmente los más usados en temas alimentarios.
- Se recomienda realizar estudios adicionales para identificar las temperaturas óptimas que maximicen las cualidades deseadas en los granos de café, particularmente en relación con las coordenadas a*.
- Ampliar la investigación para incluir otros factores que puedan influir en las características cromáticas y la calidad del café, como la composición química del sustrato de fermentación y las condiciones ambientales durante el proceso.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Agraria de Noticias. (2020). *Rendimiento productivo promedio del café en Perú es uno de los más bajos comparado con otros países*.
- Baek, I., Lee, H., Kim, M., & Cho, B. K. (2015). Hyperspectral imaging techniques for nondestructive quality evaluation of foods. *Trends in Food Science & Technology*, 230-242. Obtenido de Trends in Food Science & Technology.
- Baqueta, M. R., Alves, E. A., Valderrama, P., & Pallones, J. A. (2023). *Brazilian Canephora coffee evaluation using NIR spectroscopy and discriminant chemometric techniques*. Obtenido de Journal of food Composition and Analysis: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.105065>
- Carvajal Herrera, J., Aristizábal Torres, I., Oliveros Tascón, C., & Mejía Montoya, J. (2011). *Colorimetría del Fruto de Café (Coffea arabica L.) Durante su desarrollo y maduración*. Facultad Nacional de Agronomía Medellín, Medellín.
- Castro Silpu, W. (2016). *Aplicación de la tecnología de imágenes hiperespectrales al control de calidad de productos agroalimentarios de la región de Amazonas (Perú)*. España.
- CENIFACÉ. (2015). *Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad*.
- Changhong , L., Wei, L., Fei, M., Jianbo , Y., & Lei , Z. (2014). *Application of Multispectral Imaging to Determine Quality Attributes and Ripeness Stage in Strawberr Fruit*. Universidad de Hefei, China.
- Changhong, L., Yong, H., & Zude, M. (2014). Nondestructive evaluation of fruit quality using optical techniques. *Postharvest Biology and Technology*.
- CONAHCYT, C. P. (7 de noviembre de 2020). Obtenido de <https://www.cicy.mx/unidad-de-materiales/servicio/espectroscopia-de-infrarrojo>
- Cortés Flores, M. (2020). *Caracterización físicoquímica y sensorial del café del estado de Chiapas*. Veracruz - México.
- de Araujo, T. K., Nóbrega, R. O., Fernandes, D. D., de Araujo, M. C., Diniz, P. H., & da Silva , E. C. (2021). *Non-destructive authentication of Gourmet ground roasted coffees using NIR spectroscopy and digital images*. Obtenido de Food Chemistry: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130452>
- De La Cruz Samaniego, J. Y., & Zurita Rivera, A. M. (2021). *Efecto de la fertilización foliar como complemento en el rendimiento y calidad en taza del cultivo de cafeto (Coffea arabica L.) Var. Catimor, en la provincia de San Ignacio - Cajamarca*. Lambayeque.

- Figuroa Hernandez, E., Pérez Soto, F., & Godinez Montoya, L. (2015). *La producción y el consumo de café*. Ecofarn Spain.
- Fontal, B. (2005). *El Espectro electromagnético y sus aplicaciones*. Venezuela.
- Gabriel J, Castro C, Valverde A, & Indachochea B. (2017). Diseños experimentales: Teoría y práctica para experimentos agropecuarios. En U. E. (UNESUM), *GRUPO COMPAS* (pág. 14). Jipijapa, Ecuador.
- Gowen, A. A., O'Donnell, Cullen, P. J., Downey, G., & Frias, J.M. (Diciembre de 2007). Hyperspectral imaging – an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in Food Science & Technology*, 18, 590-598.
- Hecht, E. (2017). *Optics*. Pearson Education .
- Heise H. (2004). Fundamental chemometric methods. In: Near-Infrared. *Instrument, Applications*, 125-162.
- Heise, H. (2004). *Fundamental chemometric methods - In: Near - Infrared*. Instrument, Applications.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2019). *Manual de producción sostenible de café*. República Dominicana.
- Lucas Suarez, V. (2018). *Evaluación de la producción de variedades e híbridos de Coffea arabica (Café arábigo)*. Universidad Estatal del sur de Manabí , Manabí - Ecuador.
- Mills, R. (09 de Septiembre de 2021). *Tecnología NIR para análisis de rutina de productos alimentarios y agrícolas - FOSS*. Obtenido de <https://www.fossanalytics.com/es-mx/news-articles/technologies/nir-technology#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20de%20infrarrojo%20cercano,de%20an%C3%A1lisis%20r%C3%A1pido%20y%20preciso>.
- Paucar Anchirayco, J. A. (2010). *Influencia del tostado en los compuestos fenólicos y capacidad antioxidante de granos de café*. Satipo- Perú.
- Pérez Burillo, S., Mehta, T., Esteban Muñoz, A., Posteriza, S., Paily, O., & Rufián Henares, J. (01 de Mayo de 2019). Effect of in vitro digestion-fermentation on green and roasted coffee bioactivity: The role of the gut microbiota. *Food Chemistry*, 279, 252-259.
- PERFECT DAILY GRIND. (2019). *Geisha, Bourbon y Otros: Cómo Reconocer 6 Variedades de Café*.
- Piqueras, V. Y. (2013). *Diseño completamente al azar y ANOVA*. (U. P. Valencia, Editor) Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/2013/04/27/diseño-completamente-al-azar-y-anova/>

- Puerta, G., & Echevarry, J. (2015). *Fermentación controlada de café: Tecnología para agregar valor a la calidad*. Ciencia, Tecnología e Innovación para la Caficultura Colombiana.
- Revelo-Romo, D. M., Hurtado Gutiérrez, N. H., Hidalgo Troya, A., Amaya-Gómez, C. V., Flórez-Martínez, D. H., Overmann, J., . . . González Barrios, A. F. (2025). Omics approaches to explore the coffee fermentation microecosystem and its effects on cup quality. *Food Research International*, pág. 206. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116035>
- Rikolto. (2019). *El café peruano entre los mejores de la región*. Organización Internacional en Red.
- Sim, J., Dixit, Y., Mcgoverin, C., Oey, I., Frew, R., Reis, M. M., & Kebede, B. (2023). Support vector regression for prediction of stable isotopes and trace elements using hyperspectral imaging on coffee for origin verification. *Food Research International*, pág. 174. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113518>
- Tovar, J. (2013). *Determinación de la Actividad Antioxidante por DPPH y ABTS de 13 plantas recolectadas en la Ecoregión Cafetera*. Pereira - Colombia.
- Universidad Agraria la Molina. (2013). *Asistencia Técnica dirigida en Cosecha y postcosecha en el cultivo de café*. San Martín.
- Vásquez, N., Magán, C., Oblitas, J., Chiquizuta, T., Avila-George, H., & Castro, W. (2018). Comparison between artificial neural network and partial least squares regression models for hardness modeling during the ripening process of Swiss-type cheese using spectral profile. *Preprint submitted to Journal of Food Engineering*.
- Ventura, J. F. (2007). *Desarrollo de métodos analíticos medioambientales por espectrometría FTIR*. Universidad de Valencia.
- Viera Maza, G. (2018). *“Aplicación de procesamiento de imágenes para clasificación de granos de cacao según su color interno”*. Universidad de Piura, Piura.
- Viera Maza, G. I. (2018). *“Aplicación de procesamiento de imágenes para clasificación de granos de cacao según su color interno”*. Piura.
- Villano Obregón, A. (2021). *Producción de café (Coffea arabica L.): Experiencias en el centro poblado San Juan de Ubiriki Chanchamayo - Perene*. Lima.
- Villegas Hincapié, A. M., Pérez Henao, C., Arana, V. A., Sandoval, T., Posada Suarez, H. E., Garrido Varo, A., . . . García Olmo, J. (2014). Identificación de origen y calibración para tres compuestos químicos en café, por espectroscopia de infrarrojo cercanos. *Cenicafé*.

- Wang, K., Sol, D.-W., & Pu, H. (Septiembre de 2017). Emerging terahertz non-destructive spectroscopic imaging technique: Principle and applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 93-105.
- Zhang, S. J., De Bruyn, F., Pothakos, V., Torres, J., Falconi, C., Moccand, C., . . . De Vuyst, L. (2019). Following Coffee Production from Cherries to Cup: Microbiological and Metabolomic Analysis of Wet Processing of *Coffea arabica*. *Applied and Environmental Microbiology*, págs. 85(6), e02635-18. . doi:<https://doi.org/10.1128/AEM.02635-18>
- Zhu, M., Long, Y., Chen, Y., Huang, Y., Tang, L., Gan, B., . . . Xie, J. (2021). Fast determination of lipid and protein content in green coffee beans from different origins using NIR spectroscopy and chemometrics. *Journal of Food Composition and Analysis*, págs. 102, 104055. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104055>

IX. ANEXO FOTOGRÁFICO

9.1. Fotografías de materiales y equipos utilizados:

FIGURA 20. BALANZA ANALÍTICA MARCA PRECISA, MOD. LX220A.



FIGURA 21. BALANZA.



FIGURA 22. COLORÍMETRO MARCA KONICA MINOLTA (ESCALA CIELAB).



FIGURA 23. CÁMARA ESPECTRAL MARCA TETRACAM



FIGURA 24. BAÑO DE MARÍA



FIGURA 25. REFRIGERADORAS COLDEX (A $T^{\circ}= 8^{\circ}\text{C}$ Y $T^{\circ}= 12^{\circ}\text{C}$)



FIGURA 26. HUMIDÍMETRO MARCA PRECISA



9.2. Fotografías de metodología realizada.

FIGURA 27. RECEPCIÓN DEL CAFÉ EN CEREZA



FIGURA 28. DESPULPADO Y DESMUCILAGINADO



FIGURA 29. SELECCIÓN DE MUESTRAS (M1 =8°C, M2= 12°C Y M3 =16°C) Y ROTULADO



FIGURA 30. FERMENTACIÓN SUMERGIDA



FIGURA 31. IDENTIFICACIÓN DE LA REGIÓN A ANALIZAR



FIGURA 32. EXTRAER PERFIL MULTIESPECTRAL



FIGURA 33. SECADO EN BANDEJAS



FIGURA 34. MEDICIÓN DE HUMEDAD



FIGURA 35. ENVASADO

