

UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS



USO DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES PARA
PREDECIR LA CALIDAD SENSORIAL DE CAFÉ (*Coffea*
***arabica* L.) TOSTADOS A DIFERENTES TEMPERATURAS**
Y TIEMPOS

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

Autores: **Bach. Miguel Angel Guevara Guevara**
 Bach. Carlos Alberto Rinza Tineo

Asesor: **M. Cs. Adán Díaz Ruiz**

JAÉN – PERÚ, DICIEMBRE 2020



UNIVERSIDAD NACIONAL DE JAÉN

Ley de Creación N° 29304

Universidad Licenciada con Resolución del Consejo Directivo N° 002-2019-SUNEDU/CD

FORMATO 03: ACTA DE SUSTENTACIÓN

En la ciudad de Jaén, el día 13 de enero del año 2021, siendo las 10:00 horas, se reunieron los integrantes del Jurado:

- Presidente: Mg. Frank Fernández Rosillo
- Secretario: Mg. Sc. James Tirado Lara
- Vocal: Mg. Noly Cristóbal Vílchez Parra

para evaluar la Sustentación de:

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

Titulado: "USO DE IMÁGENES HIPERESPECTRALES PARA PREDECIR LA CALIDAD SENSORIAL DE CAFÉ (*Coffea arabica* L.) TOSTADOS A DIFERENTES TEMPERATURAS Y TIEMPOS", presentado por los Bachilleres Miguel Angel Guevara Guevara y Bachiller Carlos Alberto Rinza Tineo, de la Carrera Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Jaén.

Después de la sustentación y defensa, el Jurado acuerda:

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

Con la siguiente mención:

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

Siendo las 11:25 horas del mismo día, el Jurado concluye el acto de sustentación confirmando su participación con la suscripción de la presente.

Jaén, 13 de enero de 2021

Mg. Frank Fernández Rosillo
Presidente Jurado Evaluador

Mg. Sc. James Tirado Lara
Secretario Jurado Evaluador

Mg. Noly Cristóbal Vílchez Parra
Vocal Jurado Evaluador

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
I.INTRODUCCIÓN	1
II.OBJETIVOS	4
2.1.Objetivo general	4
2.2.Objetivos específicos	4
III.MATERIALES Y MÉTODOS	5
3.1.Lugar de ejecución	5
3.2.Materiales y equipos	5
3.2.1.Materia prima	5
3.2.2.Muestra	5
3.2.3.Equipo de laboratorio	5
3.3.Procedimientos experimentales	5
3.4.Diseño experimental	8
3.5.Recolección de datos	9
3.6.Análisis de datos	10
IV.RESULTADOS	11
4.1.Evaluación de la calidad de taza o sensorial	11
4.2.Descripción de la calidad en tasa utilizando las imágenes hiperespectrales	12
4.2.1. Calidad de tasa frente a la reflectancia de la variedad catimor	12
4.2.2. Calidad de tasa frente a la reflectancia de la variedad caturra	14
4.2.3. Análisis de variancia del brillo de café tostado	15
4.2.4. Análisis de variancia de la longitud de onda	16
4.2.5. Prueba de significación de medias	18
V.DISCUSIÓN	21
VI.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	23
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	24
DEDICATORIA	28
AGRADECIMIENTO	29
ANEXOS	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tratamientos en estudio	9
Tabla 2. Instrumento para recolección de datos	9
Tabla 3. Calidad sensorial de las variedades catimor y caturra	11
Tabla 4. Análisis de variancia de la calidad sensorial	12
Tabla 5. Brillo del café torrefacto de cada tratamiento de la variedad catimor a la longitud de onda (λ) máxima	13
Tabla 6. Brillo del café torrefacto de cada tratamiento de la variedad caturra a la longitud de onda (λ) máxima	14
Tabla 7. Análisis de variancia de brillo	16
Tabla 8. Análisis de variancia de la longitud de onda	16
Tabla 9. Prueba estadística por el método de Tukey ($\alpha=0,05$) para los tratamientos, respecto a la calidad en taza	20
Tabla 10. Resultados de la evaluación de calidad en taza del café catimor	30
Tabla 11. Resultados de la evaluación de calidad en taza del café caturra	30
Tabla 12. Especificaciones de la cámara Pika II utilizada en la investigación	31
Tabla 13. Datos de Longitud de onda en nm de la variedad catimor	32
Tabla 14. Datos de Brillo de la variedad catimor	32
Tabla 15. Datos de Longitud de onda en nm de la variedad caturra	33
Tabla 16. Datos de Brillo de la variedad caturra	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujograma del proceso de investigación	6
Figura 2. Diagrama del proceso de torrefacción	7
Figura 3. Reflectancia (GU) de la variedad catimor	13
Figura 4. Reflectancia (GU) de la variedad caturra	15
Figura 5. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad catimor a 180 °C	17
Figura 6. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad catimor a 190 °C	17
Figura 7. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad catimor a 200 °C	17
Figura 8. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad caturra a 180 °C	17
Figura 9. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad caturra a 190 °C	17
Figura 10. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad caturra a 200 °C	17
Figura 11. Muestra del café pergamino, “COOP. Diamante”	34
Figura 12. Muestra de café después del proceso de trillado “COOP. Diamante”	34
Figura 13. Muestras de café de tostado y pesado “COOP. Diamante”	34
Figura 14. Análisis organolépticos realizados en la Catación, “COOP. Diamante” ..	34
Figura 15. Fotografía 15. Pesado de muestras “Laboratorio Taller de Tecnología de Alimentos - UNJ”	35
Figura 16. Medición de humedad “Laboratorio Taller de Tecnología de Alimentos - UNJ”	35
Figura 17. Controles de calibración antes de las tomas de imágenes hiperespectral “Laboratorio Taller de Tecnología de alimentos - UNJ”	35
Figura 18. Toma de imágenes hiperespectral de los granos tostados “Laboratorio Taller de Tecnología de Alimentos - UNJ”	35

RESUMEN

El café es considerado como uno de los productos que generan desarrollo económico y su calidad es determinada por catadores expertos. La presente investigación ha tenido el objetivo utilizar imágenes hiperespectrales para predecir la calidad en taza de café tostado. Para este fin, se utilizó dos variedades de café: caturra y catimor, utilizándose el diseño en bloques completamente al azar con arreglo factorial 3 x 3, siendo los factores de tostado, la temperatura (180°C, 190°C y 200°C) y el tiempo (8, 12 y 16 minutos). En la variedad catimor tostados a 180°, 16 minutos; 190°, 8 minutos y 180°, 12 minutos alcanzaron 81,58, 81,33 y 81,33 puntos de calidad de taza, respectivamente, mientras que en la variedad caturra, tostados a 180°C, 12 minutos alcanzaron el mayor puntaje en calidad, con 83.08. Los espectros de reflectancia de los granos tostados indicaron que conforme aumenta la temperatura y tiempo de tostado, el brillo de los granos disminuye, pero no hay relación directamente proporcional a la calidad de taza. Se concluye que a longitudes de onda de 913.83 nm a 920.48 nm, se puede predecir una calidad de taza entre 80.50 a 83.08 puntos, sin importar la temperatura y tiempo de tostado.

Palabra clave. Calidad en taza, imágenes hiperespectrales, tostado del café.

ABSTRACT

The coffee is considered one of the products that generate economic development and its quality is determined by expert tasters. The present research has had the objective of using hyperspectral images to predict the quality of roasted coffee in a cup. For this purpose, two varieties of coffee were used: caturra and catimor, using the completely randomized block design with a 3 x 3 factorial arrangement, the roasting factors being the temperature (180 ° C, 190 ° C and 200 ° C) and time (8, 12 and 16 minutes). In the catimor variety toasted at 180 °, 16 minutes; 190 °, 8 minutes and 180 °, 12 minutes reached 81.58, 81.33 and 81.33 cup quality points, respectively, while in the caturra variety, roasted at 180 ° C, 12 minutes reached the highest score in quality, with 83.08. The reflectance spectra of the roasted beans indicated that as the temperature and roasting time increases, the brightness of the beans decreases, but there is no relationship directly proportional to the cup quality. It is concluded that at wavelengths from 913.83 nm to 920.48 nm, a cup quality between 80.50 to 83.08 points can be predicted, regardless of the temperature and roasting time.

Keyword. Cup quality, hyperspectral imaging, coffee roast

I. INTRODUCCIÓN

El café es una de las bebidas más populares y consumidas en el mundo (Miranda et al., 2020), ya sea por su sabor agradable o porque posee compuestos bioactivos benéficos para la salud (Moeenfard y Alves, 2020); es así que durante las campañas de 2017 a 2019, el consumo de café se incrementó en 8 % (OIC, 2019; MINAGRI, 2020) y en 2020 a pesar de que la pandemia ha logrado reducir la producción mundial de café, el consumo de este producto se ha incrementado en 0,7 % en lo que va del año. En cuanto al mercado nacional, el consumo de esta matriz alimentaria se ha incrementado en más del 100 % en los cinco últimos años registrando un consumo per cápita de 650 gramos (García, 2019). Asimismo, el Perú se ha mantenido entre los más importantes países exportadores de café, siendo el séptimo exportador en el mundo por segundo año consecutivo, registrando 4,3 millones de sacos (MINAGRI, 2020). Esta tendencia, abre oportunidades para que las industrias cafetaleras puedan seguir creciendo y ofertando un café de calidad.

La calidad del café puede ser medido en grano, mediante los análisis físicos (% humedad, la merma, el tamaño, las condiciones de los granos y el rendimiento) y en taza mediante la catación de la bebida (sabor, color, aroma, etc.) (Posada, 2019). Para obtener el café (bebida) que finalmente es el degusta el consumidor, ocurren diferentes procesos de operación que ayudan a mejorar los atributos de calidad del producto final, uno estos procesos es el tostado de los granos, siendo este un factor influyente en la calidad del producto final (Toci et al., 2020).

El tostado, es una etapa del procesamiento de café muy importante y compleja, comprende las sub etapas de secado de los granos (12 % humedad aproximadamente), el desarrollo de aroma y color mediante las reacciones químicas como la hidrólisis, polimerización y pirólisis que causan la liberación de compuestos volátiles y no volátiles, contribuyendo al cambio de las propiedades fisicoquímicas y organolépticas de los granos de café (Leme et al., 2019; Díaz et al., 2018), por ello es fundamental tener en cuenta los parámetros de torrefacción (tostado) que incluyen al tiempo y la

temperatura de tostado, cuyo control se ve reflejado en la calidad en taza del producto (Nagaraju et al., 2016; Vignoli et al., 2014).

Para controlar el grado de tostado o controlar el tiempo y temperatura de este proceso, por lo general la mayoría de industrias cafetaleras, realizan el control visual mediante la coloración de los granos que están relacionados con la calidad de la bebida y mediante la utilización de instrumentos convencionales con limitados alcances (Leme et al., 2019), ante ello se vienen realizando investigaciones que generen mejores alternativas para un adecuado monitoreo del proceso de torrefacción.

Dentro de las alternativas para predecir las propiedades cualitativas y cuantitativas de forma rápida en el café, se vienen estudiando el uso de las técnicas no convencionales (técnicas no invasivas), como las imágenes hiperespectrales, que es una tecnología novedosa en el sector alimentario que permite el análisis rápido y sin destrucción de las matrices alimentarias como el café, empleadas principalmente para la predicción del contenido de sacarosa, cafeína y trigonelina de los granos de café verde, mediante el uso de modelos predictivos de la regresión de mínimos cuadrados parciales (PLS) (Caporaso et al., 2018).

Caporaso et al. (2018) usaron imágenes hiperespectrales (100 – 2500 nm) para la predicción rápida de la humedad y el contenido total de lípidos en los granos de café verde y mediante el uso de mínimos cuadrados parciales (PLSR) se construyeron modelos de predicción cuantitativa de los granos, cuyos modelos mostraron un buen rendimiento y errores de predicción aceptables de $\pm 0,28\%$ para la humedad y $\pm 0,89\%$ para los lípidos.

Cho et al. (2017), estudiaron las propiedades cualitativas de los granos de café con cinco tipos de defectos de tostado (tostado medio - control, subdesarrollado RD1, sobre tostado RD2, subdesarrollado interior RD3 y quemado interior RD3) y los clasificaron mediante imágenes hiperespectrales (HSI); las propiedades cualitativas evaluadas fueron índice de pardeamiento, contenido de humedad, ácido clorogénico, trigonelina y porcentaje de cafeína, mientras que los espectros de HSI para la clasificación de los granos defectuosos fueron de 1000 – 1700 nm, obteniendo a RD2 como el menos defectuoso, ya que el modelo de clasificación discriminante de mínimos cuadrados parciales tuvo una precisión del 86,2% a una longitud de onda de 1400 nm, además los valores de reflectancia a esta longitud de onda mostró una tendencia similar con el

contenido de humedad, logrando con ello el uso de esta técnica para clasificar este producto.

Para contrastar la obtención de los espectros de HSI y realizar las comparaciones y predicciones de las propiedades físicas o químicas de una matriz alimentaria es necesario tener evaluaciones de control (análisis convencionales). Para el tostado de café los parámetros convencionales a evaluar por lo general son color, olor, humedad, donde este último parámetro se encuentra en 12,5% y para los atributos de color, sabor y olor, se realizan infusiones de café para la evaluación organoléptica con panelistas (León y Núñez, 2012). En estudios de torrefacción con métodos tradicionales Abarca (2017) estudió el efecto de la masa en la torrefacción del café (*Coffea arabica*), para ello analizó cuatro masas iniciales (400, 600, 800 y 1000 g) y cuatro temperaturas de calentamiento del tostador (260, 280, 300 y 320 °C), con cuatro niveles de tostado medio claro (MC); medio (M); moderadamente oscuro (MO); y oscuro (O), en el cual observó que el cambio en la masa afectó de manera significativa el tostado de los granos y con ello se incrementó el tiempo de torrefacción.

Por lo antedicho, las condiciones de tostado de los granos de café son importantes porque influye en las características sensoriales u organolépticas, es así que los avances tecnológicos permiten buscar alternativas para encontrar las mejores condiciones de tueste pero a la vez, estas condiciones de tueste sean afianzadas por tecnologías como las imágenes hiperespectrales, las cuales definirán la calidad, respectiva. En tal sentido, esta investigación pretende dar respuesta a la pregunta ¿Se predecirá la calidad de granos de café tostado a diferentes temperaturas y tiempos usando imágenes hiperespectrales? La investigación pretende determinar si el empleo de imágenes hiperespectrales es una técnica que permite predecir la calidad sensorial del café, de tal modo que para resolver el problema de la investigación se ha planteado la hipótesis: El uso de las imágenes hiperespectrales predicen la calidad de los granos de café tostados a diferentes temperaturas y tiempos, de las variedades caturra y catimor.

Finalmente, teniendo en cuenta la importancia de la calidad del café en el mercado y la influencia de la torrefacción en la calidad en taza además que, en muchos casos, hay carencia de catadores, en la presente investigación se usó imágenes hiperespectrales para predecir la calidad de café, tostados a diferentes tiempos y temperaturas, en dos variedades de café.

II. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Predicción de la calidad de taza de café (*Coffea arabica* L.), variedades catimor y caturra, a diferentes temperaturas y tiempo de torrefacción, aplicando la tecnología de imágenes hiperespectrales.

2.2. Objetivos específicos

- a) Establecer la calidad en tasa del café, de las variedades catimor y caturra, de granos tostados a 180°C (8, 12 y 16 minutos), 190°C (8, 12 y 16 minutos) y 200°C (8, 12 y 16 minutos).
- b) Identificar las longitudes de onda de las imágenes hiperespectrales en los granos tostados a 180°C (8, 12 y 16 minutos), 190°C (8, 12 y 16 minutos) y 200°C (8, 12 y 16 minutos) para predecir la calidad en taza del café.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

El Análisis sensorial se realizó en el laboratorio de la Cooperativa “El Diamante” ubicado en la ciudad de Jaén por catadores certificados “Q Grader” (“quality grader” o “evaluador de calidad”).

La obtención de las imágenes hiperespectrales (HSI) y análisis fisicoquímicos fueron realizadas en el Taller de Tecnología de Alimentos de la Carrera Profesional de Ingeniería de Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional de Jaén (UNJ).

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. Materia prima

Constituido por los granos de café beneficiado secos de las variedades catimor y caturra existente en el almacén de la Cooperativa “El Diamante”.

3.2.2. Muestra

Constituido por 6 Kg de granos beneficiados secos de café pergamino de cada variedad (catimor y caturra) proporcionado por la Cooperativa “El Diamante”

3.2.3. Equipo de laboratorio

a) Equipos

Medidor de humedad

Tostador Café Mikel

Cámara Hiperespectral Resonon Pika L

Balanza semianalítica digital

3.3. Procedimientos experimentales (figura 1)

a. Recepción de la materia prima. Se recibió 6 kg de cada variedad de café caturra y catimor proporcionado por la Cooperativa “El Diamante”

b. Trillado. Empleando una trilladora se procedió a eliminar la cascarilla apergamina que cubre el grano seco de café.

c. **Selección y clasificación.** Se seleccionó manualmente los mejores granos eliminando los defectuosos (picados, manchados, con raspaduras, perforaciones y deformidades). La clasificación se realizó de acuerdo al tamaño y forma, pasando por una zaranda de malla metálica N° 14 dejando pasar los granos pequeños y ligeros los cuales son eliminados con el fin de no perjudicar el aspecto del café verde.

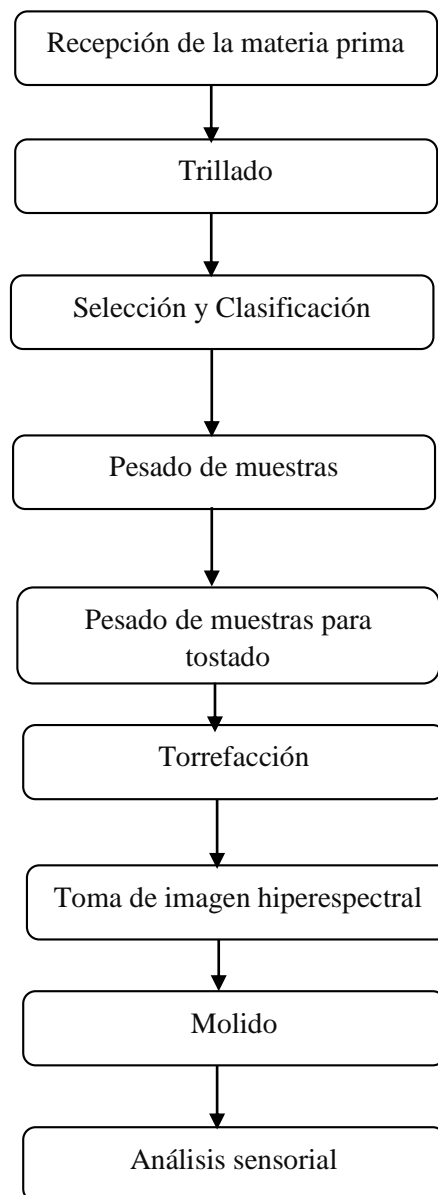


Figura 1. Flujograma del proceso de investigación.

- d. Determinación de la humedad:** Se determinó el porcentaje de humedad empleando un analizador de humedad, este valor debe estar comprendido entre 10 a 12,5%.
- e. Pesado.** Se pesaron muestras 110 g de cada variedad empleando una balanza semianalítica digital.
- f. Torrefacción:** Las muestras codificadas de cada variedad y por cada tratamiento se llevó a la tostadora para el proceso de torrefacción a diferentes tiempos (8, 12 y 16 minutos) y diferentes temperaturas (180 °C, 190 °C y 200 °C) respectivamente. Se hicieron tres repeticiones por tratamiento.

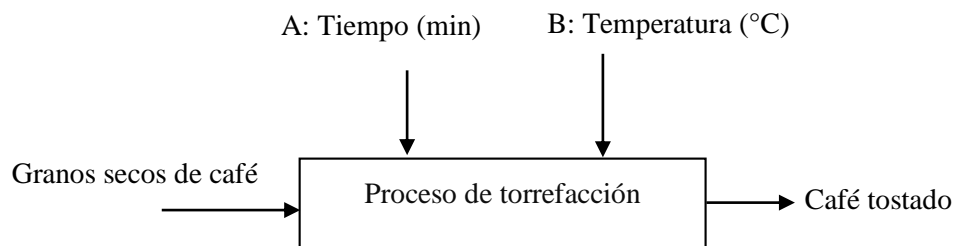


Figura 2. Diagrama del proceso de torrefacción.

g. Obtención de imágenes hiperespectrales del café tostado

Se procedió a la toma de las imágenes hiperespectrales, de cada tratamiento y repeticiones, de los granos de café tostado utilizando una cámara hiperespectral Resonon Pika L que tiene un sistema integrado de hardware y software (spectronon) para la obtención y análisis de datos. La cámara hiperespectral incorpora una curva continua de la intensidad de la luz entrante contra longitud de onda.

Para la descripción hiperespectral del proceso de torrefacción, los espectros han sido pre procesados mediante el empleo del filtro de Savitzky Golay (segunda derivada) a fin de eliminar ruido producido en la toma de datos, este filtro ha sido utilizado en investigaciones, como las realizadas por Jardim y Morgado (2020), Wu et al. (2019) y Antón et al. (2017), entre otros.

h. Análisis sensorial - calidad en taza

El análisis sensorial para la determinación de la calidad en taza se realizó con la participación de tres catadores con certificación “Q Grader” (“quality grader” o “evaluador de calidad”).

Se determinó la calidad en taza de cada tratamiento con tres repeticiones y por cada variedad de café, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- Se pesó 8.25 g de café tostado molido de cada muestra para cada taza de 150ml debidamente rotulado.
- Los catadores pasaron a oler la muestra molida colocada en la taza.
- Se le adicionó agua hervida a 93°C aproximadamente hasta el borde de la taza y directamente sobre la dosis del café molido.
- Se dejó en reposo de 3 a 5 minutos.
- Los catadores pasaron a oler los aromas liberados por el café al ser remojados.
- Pasaron a oler los aromas mientras se rompe la espuma.
- Finalmente pasaron al sentido del gusto por cada una de las tazas.
- Anotaron las características sensoriales en la hoja del protocolo de análisis sensorial.

3.4. Diseño experimental

El diseño experimental fue de bloques completamente al azar (DBCA) con arreglo factorial de AxB con tres repeticiones, donde el factor A corresponde a temperatura (°C) y el factor B a tiempo (min).

Tratamientos en estudio

Tabla 1.

Tratamientos en estudio para el proceso de torrefacción de cada variedad de café.

Código	Factor A	Factor B	Tratamiento
T ₁	A ₁	B ₁	A ₁ B ₁
T ₂		B ₂	A ₁ B ₂
T ₃		B ₃	A ₁ B ₃
T ₄	A ₂	B ₁	A ₂ B ₁
T ₅		B ₂	A ₂ B ₂
T ₆		B ₃	A ₂ B ₃
T ₇	A ₃	B ₁	A ₃ B ₁
T ₈		B ₂	A ₃ B ₂
T ₉		B ₃	A ₃ B ₃

A = Temperatura de tostado (A₁=180, A₂=190 y A₃=200 °C)

B = Tiempo de tostado (B₁=8, B₂=12 y B₃=16 min)

3.5. Recolección de datos

Se utilizó el siguiente instrumento:

Tabla 2.

Instrumento para la recolección de datos.

Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Repetición	Análisis organoléptico – Calidad en taza											
			Fragancia/aroma	Sabor	Sabor Residual	Acidez	Cuerpo	Uniformidad	Balance	Taza Limpia	Dulzor	Puntaje Catador	Puntaje Total	
180	8	R1												
		R2												
		R3												
	12	R1												
		R2												
		R3												
	16	R1												
		R2												
		R3												
190	8	R1												
		R2												
		R3												
	12	R1												
		R2												
		R3												
	16	R1												
		R2												
		R3												
200	8	R1												
		R2												
		R3												
	12	R1												
		R2												
		R3												
	16	R1												
		R2												
		R3												

3.6. Análisis de datos

Se realizó la prueba estadística de Fisher al 0.05 de probabilidad. Mediante la prueba de Tukey se determinó si existe diferencia significativa entre las medias de los tratamientos.

IV. RESULTADOS

4.1. Evaluación de la calidad de taza o sensorial

En la tabla 3, se observa la calidad en taza de café de las variedades catimor y caturra, según los factores de temperatura y tiempo que se utilizó en la investigación. En la variedad catimor se observa que a temperatura de 200 °C de tostado con tiempos de 12 y 16 minutos, la calidad en taza disminuye por debajo de los 80 puntos (12 min=79.33 y 16 min=78.75). En la variedad caturra, usando una temperatura de 200°C en el tostado con tiempo de 16 minutos, la calidad también se ve disminuida (79.67 puntos)

Tabla 3.

Calidad sensorial de las variedades catimor y caturra.

Tratamientos		Variedad	
Temperatura (°C)	Tiempo (min)	Catimor	Caturra
180 °C	8 min	80.50	81.08
	12 min	81.33	83.08
	16 min	81.58	81.33
190 °C	8 min	81.33	81.42
	12 min	80.83	80.58
	16 min	80.58	81.50
200 °C	8 min	80.67	80.92
	12 min	79.33	80.50
	16 min	78.75	79.67

En la tabla 4, para la calidad de taza, el análisis de variancia al 0.05 de probabilidad muestra que, para ambas variedades de café, existe significación estadística en los factores de temperatura y tiempo de tostado así como, la interacción de ambas variables. En cambio, para los catadores no existió significación estadística, indicando

que la catación de café fue confiable. Los coeficientes de variabilidad indican que la investigación se realizó de manera eficiente.

Tabla 4.

Análisis de variancia de la calidad sensorial.

Fuentes de Variación	GL	Catimor			Caturra			F tabular	
		SC	CM	Fobs.	SC	CM	Fobs.	0.05	0.01
Catadores	2	0.06	0.03	0.56 NS	0.59	0.29	2.57 NS	3.63	6.23
Tratamientos	8	21.34	2.67		20.88	2.61			
Temperatura	2	12.74	6.37	119.01 **	9.78	4.89	42.79 **	3.63	6.23
Tiempo	2	1.28	0.64	11.98 **	1.39	0.70	6.10 *	3.63	6.23
Interacción (Tiempo x Temperatura)	4	7.31	1.83	34.16 **	9.70	2.43	21.23 **	3.01	4.77
Error	16	0.86	0.05		1.83	0.11			
Total	26	22.19			22.71				
Coeficiente de variación				0.29 %			0.42 %		

NS: No significativo *: significativo **: altamente significativo

4.2. Descripción de la calidad en tasa utilizando las imágenes hiperespectrales

4.2.1. Calidad de tasa frente a la reflectancia de la variedad catimor

En la tabla 5 se muestran los espectros de reflexión para los nueve tratamientos a diversas temperaturas y tempos de torrefacción para la variedad catimor. En estos espectros se observa que los puntos de máximo brillo o reflectancia para cada tratamiento se da a una longitud de onda máxima que corresponde a los valores de 916.05 o 916.79 nm.

Tabla 5.

Brillo del café torrefacto de cada tratamiento de la variedad catimor a la longitud de onda (λ) máxima.

Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Calidad Sensorial (%)	λ (nm)	Brillo (GU)
180	8	80.50	916.79	5443.42
	12	81.33	917.53	4522.42
	16	81.58	918.27	3955.85
190	8	81.33	916.79	5117.53
	12	80.83	913.83	4102.48
	16	80.58	919.00	4148.34
200	8	80.67	916.05	5108.30
	12	79.33	917.53	4126.22
	16	78.75	916.79	3501.11

En la figura 3 se muestran los espectros de reflexión para los nueve tratamientos a diversas temperaturas y tiempos de torrefacción para la variedad catimor. En estos espectros se observan que los puntos de máximo brillo o reflectancia para cada tratamiento se da a una longitud de onda máxima que corresponde a los valores de 916.79 o 916.05 nm a temperaturas y tiempos de tostado de 180°C, 8 min.; 190°C, 8 min. y 200°C, 8 min. que corresponden a 80.50, 81.33 y 80.67 puntos de calidad en taza. Así mismo, a medida que aumenta el tiempo de tostado el brillo, en los granos tostados, va disminuyendo.

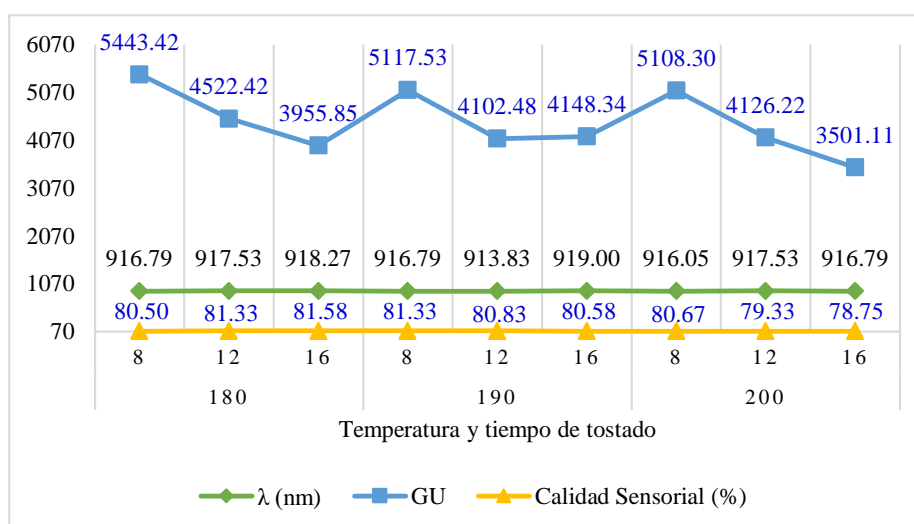


Figura 3. Reflectancia (GU) de la variedad catimor.

4.2.2. Calidad de taza frente a la reflectancia de la variedad caturra

En la tabla 6, los espectros de reflexión para los nueve tratamientos a diversas temperaturas y tiempos de torrefacción para la variedad caturra muestran que los puntos de máximo brillo o reflectancia para cada tratamiento se da a una longitud de onda máxima que corresponde a las temperaturas y tiempo de tostado de los granos de 180°C, 8 min., 190°C, 8 min. y 200°C, 8 min. correspondiendo a una longitud de onda de 917.53, 917.53 y 920.48 nm, respectivamente.

Tabla 6.

Brillo del café torrefacto de cada tratamiento de la variedad caturra a la longitud de onda (λ) máxima.

Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Calidad Sensorial (%)	λ (nm)	Brillo (GU)
	8	81.08	917.53	4950.22
180	12	83.08	915.31	4491.26
	16	81.33	918.27	4039.64
	8	81.42	917.53	4911.76
190	12	80.58	916.79	4323.30
	16	81.50	916.79	4194.50
	8	80.92	920.48	4990.70
200	12	80.50	919.74	4082.53
	16	79.67	918.27	3988.24

En la figura 4, al igual que en la variedad catimor, los espectros de reflexión para los nueve tratamientos a diversas temperaturas y tiempos de torrefacción indican que los puntos de máximo brillo o reflectancia se da en un tiempo de 8 minutos de exposición de tostado a las tres temperaturas utilizadas y, conforme aumenta el tiempo de tostado el brillo de los granos tostados va disminuyendo. Se observa también que en estos brillos máximos, la calidad de taza es de 81.08, 81.42 y 80.92 puntos.

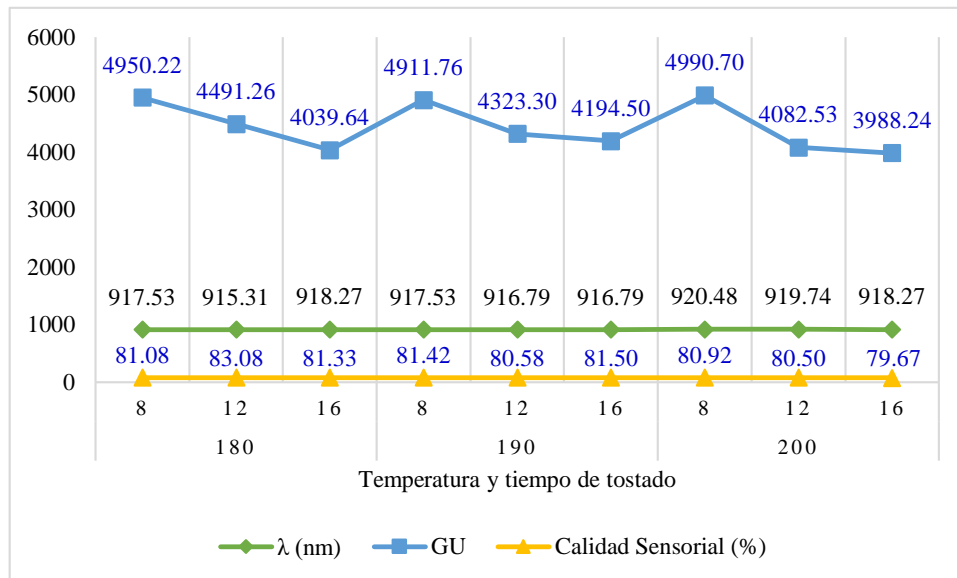


Figura 4. Reflectancia (GU) de la variedad caturra.

En las figuras 5, 6, 7 (y tabla 5), para la variedad catimor, se observa que el brillo máximo de los granos tostados a temperaturas de 180°C, 190°C y 200°C y tiempos de 8 min., 12 min. y 16 min., se da a una longitud de onda entre 916.05 nm a 919.0 nm; siendo las calidades de taza de café entre 78.75 a 81.58 puntos. Por otro lado, con respecto a la variedad caturra, en las figuras 8, 9 y 10 (tabla 6), el brillo máximo emitido por los granos tostados a 180°C, 190°C y 200°C y tiempos de 8 min., 12 min. y 16 min. es entre 915.31 nm y 920.48 nm.; es decir, entre estas longitudes de onda y brillo máximo leído en el hiperspectrofotómetro, alcanzaría detectar la calidad de café en puntajes que varían de 79.67 a 83.08.

4.2.3. Análisis de variancia del brillo de café tostado

En la tabla 7, se observa que en la variedad catimor existe significación estadística tanto en el factor temperatura de tostado como el tiempo de tostado; sin embargo, la interacción de estos dos factores no existe diferenciación estadística. Algo semejante sucede en la variedad caturra, la misma que muestra significación estadística sólo en el factor tiempo. Estos resultados dan a entender que el tiempo de tostado a cualquier temperatura influye en la calidad y en el brillo de los granos tostados.

Tabla 7.*Análisis de variancia de brillo.*

Fuentes de Variación	GL	Catimor			Caturra			F tabular	
		SC	CM	Fobs.	SC	CM	Fobs.	0.05	0.01
Repeticiones	2	209992.43	104996.22	1.51 NS	455572.50	227786.25	1.46 NS	3.63	6.23
Tratamientos	8	9996597.68	1249574.71		4064444.29	508055.54			
Temperatura	2	704411.10	352205.55	5.08 *	104749.85	52374.93	0.34 NS	3.63	6.23
Tiempo	2	8781374.11	4390687.05	63.27 **	3732696.00	1866348.00	11.96 **	3.63	6.23
Interacción (Tiempo x Temperatura)	4	510812.48	127703.12	1.84 NS	226998.44	56749.61	0.36 NS	3.01	4.77
Error	16	1110374.41	69398.40		2495883.88	155992.74			
Total	26	11106972.09			6560328.17				
Coefficiente de variación			5.92 %			8.89 %			

NS: No significativo

*: significativo

**: altamente significativo

4.2.4. Análisis de variancia de la longitud de onda

En la tabla 8, se observa que tanto en la variedad catimor y en la variedad caturra, no existen diferencias estadísticas en la temperatura y el tiempo de tostado, lo cual implica que las muestras de café tostado no influyen en el funcionamiento de la cámara hiperespectral.

Tabla 8.*Análisis de variancia de la longitud de onda.*

Fuentes de Variación	GL	Catimor			Caturra			F tabular	
		SC	CM	Fobs.	SC	CM	Fobs.	0.05	0.01
Catadores	2	48.32	24.16	1.55 NS	37.43	18.71	1.54 NS	3.63	6.23
Tratamientos	8	51.66	6.46		59.22	7.40			
Temperatura	2	4.73	2.37	0.15 NS	36.34	18.17	1.49 NS	3.63	6.23
Tiempo	2	15.64	7.82	0.50 NS	6.91	3.45	0.28 NS	3.63	6.23
Interacción (Tiempo x Temperatura)	4	31.28	7.82	0.50 NS	15.97	3.99	0.33 NS	3.01	4.77
Error	16	249.00	15.56		194.61	12.16			
Total	26	300.65			253.83				
Coefficiente de variación			0.43 %			0.38 %			

NS: No significativo

*: significativo

**: altamente significativo

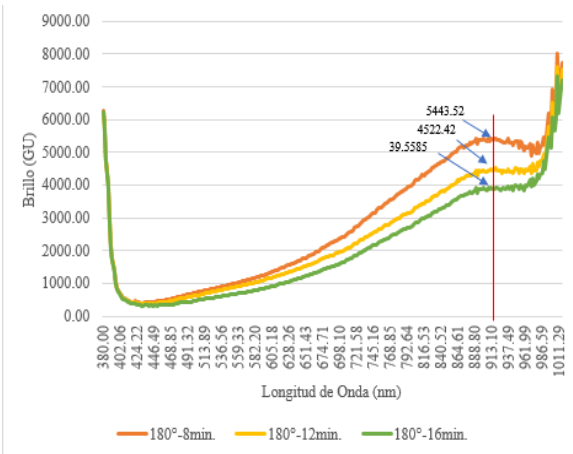


Figura 5. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad catimor a 180 °C.

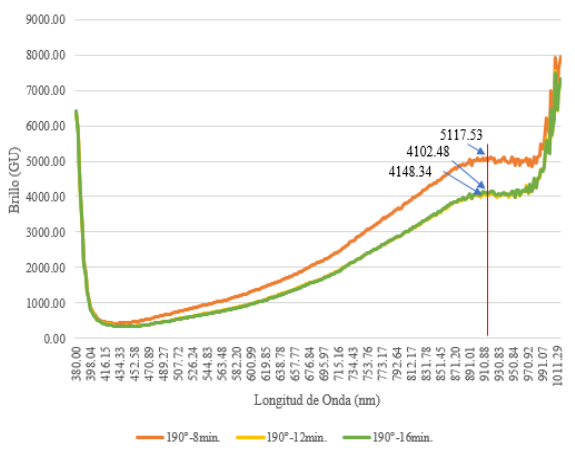


Figura 6. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad catimor a 190 °C.

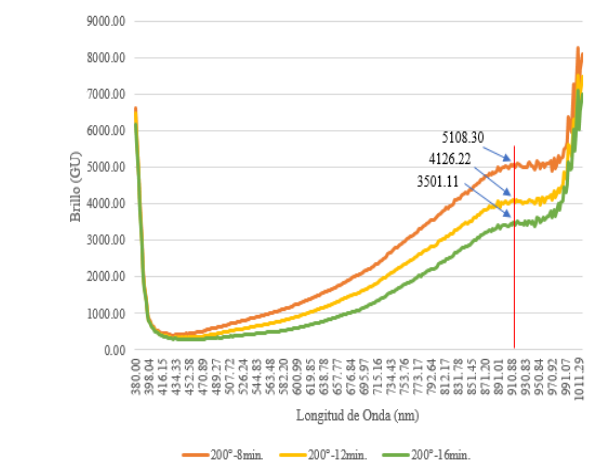


Figura 7. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad catimor a 200 °C.

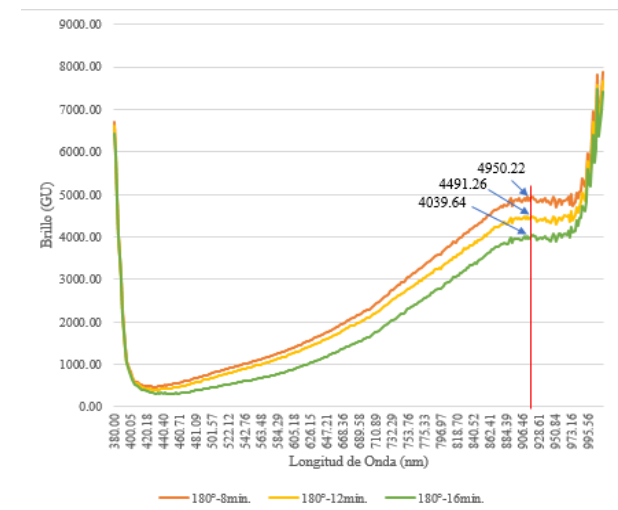


Figura 8. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad caturra a 180 °C.

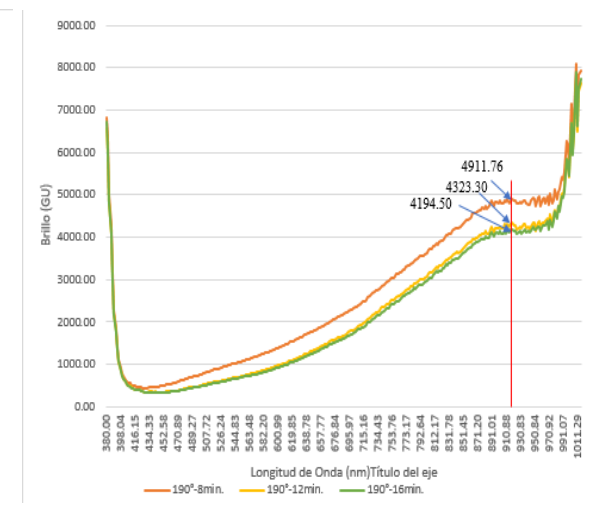


Figura 9. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad caturra a 190 °C.

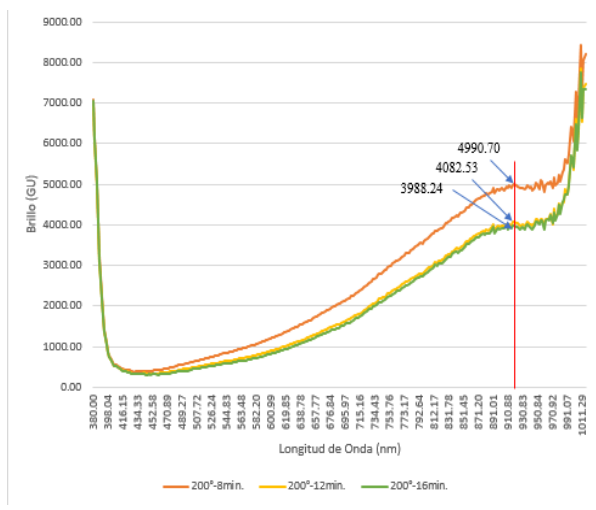


Figura 10. Espectros de reflectancia de café torrefacto de la variedad caturra a 200 °C.

4.2.5. Prueba de significación de medias

En la tabla 9, se muestra la prueba de significación de medias por el método de Tukey al 0.05 de probabilidad, para la calidad de taza, la longitud de onda y brillo. En este caso, se observa que se comprueba lo encontrado en el ANVA, pues la variedad catimor muestra que, al ser tostado a 180°C y 16 minutos, 190°C y 8 minutos y 180°C y 12 minutos superan estadísticamente a los demás tratamientos, pero no difieren estadísticamente entre ellos, alcanzando calidades de 81.58, 81.33 y 81.33 puntos, respectivamente. También, se observa que la calidad de taza procedentes de granos tostados a 190°C-12 minutos, 200°C-8 minutos, 190°C-16 minutos y 180°C-8 minutos, no tienen diferencias significativas, mientras que la calidad a 200°C-12 minutos y 200°C-16 minutos, la calidad se ve disminuida.

Para la variedad catimor, Tabla 8, indica que la calidad en taza de los granos tostados a 180°C-12 minutos, alcanza un puntaje de 83.08 y superan estadísticamente a los demás tratamientos. Asimismo, la calidad de taza de los granos tostados a 190°C-16 minutos, 190°C-8 minutos, 180°C-16 minutos, 180°C-8 minutos y 200°C 8 minutos, tampoco difieren estadísticamente entre sí, coincidiendo de este modo, con lo encontrado en la variedad catimor. Esto da a entender que la calidad de taza en ambas variedades cuyos granos son tostados a temperaturas de 180°C (8, 12 y 16 minutos), 190°C (8 y 16 minutos) y 200°C (8 minutos) mantienen una calidad en taza aceptable.

Para determinar la calidad de taza usando imágenes hiperespectrales, se acudió a realizar, la prueba estadística que, también, se muestra en la Tabla 8, pudiendo observarse que en la longitud de onda no hay diferencias estadísticas significativas para ambas variedades, lo cual es cierto ya que esta longitud de onda depende del manipulador y del mismo equipo hiperespectral, al captar en cada espectro visible la detección del máximo brillo emitido por los granos tostados. En cambio, respecto al brillo si hay diferencias significativas entre tratamientos; esto es, que en la variedad catimor, los granos tostados a 180°C-8 minutos, 190°C-8 minutos y 200°C-8 minutos, alcanzaron el máximo brillo (a una longitud de onda de 916.79 nm, 916.79 nm y 916.05 nm, respectivamente) pero no difieren estadísticamente, entre sí, a la vez que superan estadísticamente a los demás tratamientos. También, los resultados muestran que, el brillo en los granos tostados a 180°C-12 minutos, 190°C-16 minutos, 200°C-12 minutos, 190°C-12 minutos y 180°C-16 minutos, no presentan diferencias significativas entre ellos alcanzando calidades en taza por sobre los 80 puntos, a

excepción de los granos tostados a 200°-12 minutos, que alcanzó un puntaje de 79.33 de calidad en taza.

Por otro lado, en la variedad caturra, el brillo en cada uno de los granos tostados a las diversas temperaturas y tiempo, usados, se comportan de manera similar, no existiendo diferencias significativas.

Tabla 9.

Prueba estadística por el método de Tukey ($\alpha=0,05$) para los tratamientos, respecto a la calidad en taza.

Calidad Sensorial								Longitud de Onda								Brillo Hiperespectral							
Catimor				Caturra				Catimor				Caturra				Catimor				Caturra			
Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Orden de mérito	Significancia (0.05)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Orden de mérito	Significancia (0.05)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Orden de mérito	Significancia (0.05)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Orden de mérito	Significancia (0.05)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Orden de mérito	Significancia (0.05)	Temperatura (°C)	Tiempo (minutos)	Orden de mérito	Significancia (0.05)
180	16	81.58	A	180	12	83.08	A	190	16	919.00	A	200	8	920.48	A	180	8	5443.42	A	200	8	4990.7	A
190	8	81.33	A	190	16	81.50	B	180	16	918.27	A	200	12	919.74	A	190	8	5117.53	A	180	8	4950.22	A
180	12	81.33	A	190	8	81.42	B C	200	12	917.53	A	200	16	918.27	A	200	8	5108.30	A	190	8	4911.76	A
190	12	80.83	B	180	16	81.33	B C D	180	12	917.53	A	180	16	917.53	A	180	12	4522.42	B	180	12	4491.26	A
200	8	80.67	B	180	8	81.08	B C D	200	16	916.79	A	190	8	916.79	A	190	16	4148.34	B C	190	12	4323.3	A
190	16	80.58	B	200	8	80.92	B C D	190	8	916.79	A	180	8	916.79	A	200	12	4126.22	B C	190	16	4194.5	A
180	8	80.50	B	190	12	80.58	C D	180	8	916.79	A	190	16	916.05	A	190	12	4102.48	B C	200	12	4082.53	A
200	12	79.33	C	200	12	80.50	D	200	8	916.05	A	190	12	916.05	A	180	16	3955.85	B C	180	16	4039.64	A
200	16	78.75	D	200	16	79.67		190	12	913.83	A	180	12	915.31	A	200	16	3501.11	C	200	16	3988.24	A

V. DISCUSIÓN

Los resultados referentes al análisis sensorial o calidad de taza, a las diferentes temperaturas utilizadas indican que las calidades en ambas variedades están cercanas a los 80 puntos. En la variedad catimor, solamente en las temperaturas de 200 °C a tiempos de 12 y 16 minutos, los valores están por debajo de los 80 puntos, que según la escala SCA corresponde a una calificación “debajo de la calidad especial”. Parecido sucede en la variedad caturra, en la cual a temperatura de 200°C-16 min. de tostado, también la calidad es menor a 80 puntos. Sin embargo, a estos niveles de temperatura y tiempo de tostado, coinciden con otras investigaciones en la cual usando temperatura de 180°C la calidad obtuvo 70.5 a 80.5 (Benitez y Campo, 2018). Las variaciones de calidad entre tratamientos, indican que a mayor temperatura de tostado la calidad disminuye, dando a entender que los parámetros de temperatura y tiempo de tostado tienen efecto en el contenido de ceniza, pH, acidez, proteína, lípidos, sólidos totales, polisacáridos, sacarosa y cafeína, además que la temperatura y tiempo de tostado también influye en la calidad de taza, tal como lo reportó Andrade (2018), quien encontró que a 190 °C y 18 minutos de tostado, la calidad fue de 81.30 en la variedad caturra amarillo. Así mismo, para la variedad catimor, el tratamiento con mayor puntaje las condiciones de torrefacción fueron de 180 °C y 16 minutos; para la variedad caturra fueron de 180 °C y 12 minutos, coincidiendo con los obtenidos por Gamboa et al. (2013), quienes obtuvieron calidad en taza entre 81.2 a 88.7 para los parámetros de torrefacción de 210 °C de temperatura y un tiempo entre 9 a 11 min. Estos resultados que coinciden con lo encontrado en la presente investigación, nos da a entender que los factores de tiempo y temperatura tienen influencia en la calidad de taza.

Si bien la calidad en taza, en Jaén, se da a través de la catación por catadores expertos y certificados, también es posible tener en cuenta otra alternativa de predicción de la calidad, en este caso mediante imágenes hiperespectrales. Al respecto, los resultados de esta investigación muestran que, los espectros de reflectancia mostrados en las figuras 3 y 4 (tablas 5 y 6) indican que un tostado de 8 minutos a 180°C, 190°C y

200°C, ocasionan mayor aumento del brillo, pero no se correlacionan con las mejores calidades de taza, toda vez que, la prueba de comparación de medias de Tukey al 0.05 de probabilidad, indican que, al no haber significancia estadística de brillo en la variedad caturra, se puede decir que a longitudes de onda entre 915.31 nm a 920.48 nm, las imágenes hiperespectrales podrían predecir calidades de taza entre 79.67 a 83.08 puntos, sin importar las temperaturas y tiempos de tostado, usados en el presente ensayo. Por el contrario, en la variedad catimor, también, se puede decir que, en longitudes de onda entre 913.83 nm y 919.00 nm, se puede predecir la calidad en taza entre 78.75 a 81.58 puntos. Esto quiere decir que, de acuerdo a los resultados, se acepta la hipótesis de esta investigación, toda vez que las longitudes de onda de las imágenes hiperespectrales tienen relación con la calidad sensorial, constituyendo una herramienta para el análisis de alimentos (Valdiviezo, 2007), como el café, toda vez que las imágenes hiperespectrales (HSI) muestran eficacia en el análisis de sacarosa, cafeína y trigonelina en granos de café verde, los cuales son compuestos que reflejan al final en la calidad de taza (Caporaso, Whiworth, Grebby y Fisk, 2018).

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- En la variedad catimor el mejor puntaje se obtuvo a un tostado de 180°C y 16 minutos, 190°C y 8 minutos y 180°C y 12 minutos, con puntajes de 81.58, 81.33 y 81.33.
- En la variedad caturra la mejor calidad de taza se obtuvo a 180°C y 12 minutos con puntaje de 83.08.
- Las variedades de café caturra y catimor presentan espectros de reflectancia similares cuyas longitudes de onda de máxima reflectancia se ubican entre 913.83 y 920.48 nm., que pueden predecir calidades de taza entre 80.50 a 83.08.
- Al aumentar la temperatura y el tiempo de torrefacción, la reflectancia o brillo de los granos tostados disminuye, pero no hay una relación directamente proporcional a la calidad de taza.

Recomendaciones

- Realizar estudios más exhaustivos para la validación de las imágenes hiperespectrales en la predicción de la calidad de taza del café, dado que en este estudio se ha demostrado que las longitudes de onda y brillo tienen comportamiento similar, sin importar la variedad y temperatura y tiempo de torrefacción.
- Para el análisis organoléptico se recomienda emplear un mayor número de catadores experimentados para evaluar la calidad en taza y desarrollar modelos que lo relacionen con los espectros de reflectancia y permitan emplearlos en procesos de control de calidad del café tostado.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abarca, R. (2017). Estudio del proceso de torrefacción del café (*Coffea arabica*) en tostador convencional. San José, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
<http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/75352>
- Andrade, K.M. (2018). Evaluación de los parámetros tiempo, temperatura y variedad de café arábica (*Coffea arabica*) caturra amarillo y SL-28 en el proceso de tostado [tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. Repositorio Institucional.
<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/8594/1/03%20EIA%20467%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>
- Arismendy, J. H. (2015). Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza (p. 100) [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional.
<http://bdigital.unal.edu.co/51841/1/1128270450.2016.pdf>
- Benitez, O.J. y Campo, D.A. (2018). Evaluación de la calidad el café tostado utilizando herramientas de procesamiento digital de imágenes. Revista de la Asociación Colombiana de Ciencias Biológicas, 30, 30-41.
https://www.researchgate.net/profile/Diego_Campo_Ceballos/publication/329755949_Evaluation_of_roast_coffee_quality_using_digital_image_processing_tools/links/5c1921b2a6fdccfc705723ff/Evaluation-of-roast-coffee-quality-using-digital-image-processing-tools.pdf
- Cabrera, C., & Leymer, J. (2017). Predicción del color y humedad en granos de café variedad arábica (*Coffea arabica* L.) usando imágenes Hiperespectrales (prediction of color and humidity in coffee beans arabic variety (coffea arabica l.) using hyperpephic imaging). Universidad Nacional de Trujillo.
<http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/10037>
- Caporaso, N., Whitworth, M. B., Grebby, S., & Fisk, I. D. (2018a). Non-destructive analysis of sucrose, caffeine and trigonelline on single green coffee beans by hyperspectral imaging. *Food Research International*, 106, 193-203.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.12.031>

- Caporaso, N., Whitworth, M. B., Grebby, S., & Fisk, I. D. (2018b). Rapid prediction of single green coffee bean moisture and lipid content by hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 227, 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.01.009>
- Cho, J.-S., Bae, H.-J., Cho, B.-K., & Moon, K.-D. (2017). Qualitative properties of roasting defect beans and development of its classification methods by hyperspectral imaging technology. *Food Chemistry*, 220, 505-509. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.09.189>
- Cruz, J. T., Rodríguez-Pérez, W., Suárez-Salazar, J. C., Ordoñez-Espinosa, C. M., Vega-Cano, G. A., Cruz-Bolivar, J. T., Rodríguez-Pérez, W., Suárez-Salazar, J. C., Ordoñez-Espinosa, C. M., & Vega-Cano, G. A. (2017). Minority compounds and sensory analysis evaluation of *Coffea arabica* var. Caturra cultivated in three different altitudinal ranges. *Acta Agronómica*, 66(2), 221-227. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n2.58126>
- Díaz, F. O., Ormaza, A. M., Rojano, B. A., Díaz, F. O., Ormaza, A. M., & Rojano, B. A. (2018). Efecto de la Tostión del Café (*Coffea arabica* L. var. Castillo) sobre el Perfil de Taza, Contenido de Compuestos Antioxidantes y la Actividad Antioxidante. *Información Tecnológica*, 29(4), 31-42. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000400031>
- Diezma, B., Correa, E. C., Díaz, V., Echeverry, C. A., Meneses, B., & Oteros, R. (2017, 4-6 setiembre). Evaluación espectroscópica de un nuevo producto a base de pulpa de café. Bragança, Portugal. http://oa.upm.es/50104/1/INVE_MEM_2017_272302.pdf.
- Diviš, P., Pořízka, J., & Kříkala, J. (2019). The effect of coffee beans roasting on its chemical composition. *Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences*, 13 (1), 344-350. <https://doi.org/10.5219/1062>.
- Gamboa, P.Y, Mosquera, S.A. y Paz, I.E. (2013). Caracterización de taza de café especial en el municipio de Chachaguí, departamento de Nariño, Colombia. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11 (2), 85-92. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v11n2/v11n2a10.pdf>.
- García, G. (2019, junio 3). Los peruanos toman 40 tazas de café al año, según estudio. La Ruta del Café Peruano. <https://rutadelcafeperuano.com/2019/06/03/consumocafeperuano/>

- Villegas, A.M., Pérez, C., Arana, V.A., Sandoval, T., Posada, H. E., Garrido, A., Guerrero, J., Pérez, D. y García, J. (2014). Identificación de origen y calibración para tres compuestos químicos en café, por espectroscopía de infrarojo cercano. *Revista Cenicafé*, 65 (1), 7-16. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/551/1/arc065%2801%297-16.pdf>
- Jardim, R., & Morgado, F. (2020). Savitzky–Golay filtering as image noise reduction with sharp color reset. *Microprocessors and Microsystems*, 74, 103006. <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103006>
- Lee, S. J., Kim, M. K., & Lee, K.-G. (2017). Effect of reversed coffee grinding and roasting process on physicochemical properties including volatile compound profiles. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 44, 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.07.009>
- Leme, D. S., da Silva, S. A., Barbosa, B. H. G., Borém, F. M., & Pereira, R. G. F. A. (2019). Recognition of coffee roasting degree using a computer vision system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 312-317. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.11.029>
- León, N., & Núñez, L. (2012). (PDF) Parámetros tecnológicos para la torrefacción del café orgánico en la Cooperativa Agraria Rodríguez de Mendoza—COOPARM. ResearchGate. <https://doi.org/10.32911/as.2012.v5.n2.556>
- MINAGRI. (2020). Observatorio de COMMODITIES: Café. https://www.inia.gob.pe/wp-content/uploads/2020/04/Reporte_Obs_Commodities_Cafe.pdf
- Miranda, A. M., Goulart, A. C., Benseñor, I. M., Lotufo, P. A., & Marchioni, D. M. (2020). Coffee consumption and risk of hypertension: A prospective analysis in the cohort study. *Clinical Nutrition*. <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2020.05.052>
- Moenfard, M., & Alves, A. (2020). New trends in coffee diterpenes research from technological to health aspects. *Food Research International*, 134, 109207. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109207>
- Nagaraju, V. D., Ramalakshmi, K., & Sridhar, B. S. (2016). Cryo assisted spouted bed roasting of coffee beans. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 37, 138-144. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.016>
- Nakilcioğlu, E., Ötleş, S., Nakilcioğlu-Taş, E., & Ötleş, S. (2019). Physical characterization of Arabica ground coffee with different roasting degrees. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 91(2). <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180191>

- OIC. (2019). Anuario de la OIC 2017/18. <http://www.ico.org/documents/cy2018-19/annual-review-2017-18-c.pdf>
- Posada, S. G. (2019, marzo 4). ¿Cómo se determina la calidad del café? Qué Café! <https://quecafe.info/como-se-determina-la-calidad-del-cafe/>
- Riaño, C. (2013). Efecto de la humedad del café crudo en las propiedades del café tostado. 9. <http://www.scielo.org.co/pdf/entra/v9n2/v9n2a15.pdf>
- Toci, A. T., Azevedo, D. A., & Farah, A. (2020). Effect of roasting speed on the volatile composition of coffees with different cup quality. *Food Research International*, 137, 109546. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109546>
- Valdiviezo, J.C. (2007). Segmentación de Imágenes Hiperespectrales usando Memorias Asociativas Morfológicas [Tesis de postgrado, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica. Repositorio Institucional. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/668/1/ValdiviezoNJC.pdf>
- Valencia, J., Pinzón Magda, & Gutiérrez Ramón. (2012). Caracterización fisicoquímica y sensorial de tazas de café producidas en el departamento de Quindío. *Revista Alimentos Hoy*, 23 (36), 150-156. <https://alimentos hoy.acta.org.co/index.php/hoy/article/view/352/302>
- Vignoli, J. A., Viegas, M. C., Bassoli, D. G., & Benassi, M. de T. (2014). Roasting process affects differently the bioactive compounds and the antioxidant activity of arabica and robusta coffees. *Food Research International*, 61, 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.06.006>
- Wu, J. M.-T., Tsai, M.-H., Huang, Y. Z., Islam, S. H., Hassan, M. M., Alelaiwi, A., & Fortino, G. (2019). Applying an ensemble convolutional neural network with Savitzky–Golay filter to construct a phonocardiogram prediction model. *Applied Soft Computing*, 78, 29-40. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.01.01>

DEDICATORIA

A mi Dios por estar siempre con nosotros y a mis padres; por su comprensión incondicional y motivación; que siempre estuvieron impulsando a seguir adelante, gracias mil.

Miguel Angel Guevara Guevara

A mi Dios, gracias por su apoyo incondicional.
A mis padres y hermanos, sin ellos no hubiera logrado estar en el camino de la superación.

Carlos Alberto Rinza Tineo

AGRADECIMIENTO

Al mejor guía de nuestras vidas: Dios

A nuestro asesor **M. Cs. Adán Díaz Ruiz** por compartir sus enseñanzas, por sus consejos y por su disponibilidad de tiempo empleado en nosotros.

A nuestros familiares en general, por su apoyo incondicional, confianza y motivación.

A la Universidad Nacional de Jaén por formación brindada hacia nosotros

A la cooperativa “El Diamante” por los servicios brindados y recomendaciones para un buen desarrollo de resultados obtenidos para nuestra tesis.

ANEXOS

Anexo 1. Análisis de la calidad en taza del café

Tabla 10.

Resultados de la evaluación de calidad en taza del café catimor.

Repeticiones	Tratamientos									Total Rep.
	180 °C			190 °C			200 °C			
	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	
R1	80.50	81.50	81.75	81.75	81.00	80.75	80.50	79.00	78.75	725.50
R2	80.50	81.25	81.50	81.00	80.75	80.75	80.75	79.50	78.50	724.50
R3	80.50	81.25	81.50	81.25	80.75	80.25	80.75	79.50	79.00	724.75
Total Tratamientos	241.50	244.00	244.75	244.00	242.50	241.75	242.00	238.00	236.25	2174.75
Promedio Tratamientos	80.50	81.33	81.58	81.33	80.83	80.58	80.67	79.33	78.75	

Tabla 11.

Resultados de la evaluación de calidad en taza del café caturra.

Repeticiones	Tratamientos									Total Rep.
	180 °C			190 °C			200 °C			
	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	
R1	81.50	83.50	81.50	81.25	80.75	82.00	81.00	80.75	79.50	731.75
R2	80.75	83.00	81.00	81.50	80.25	81.75	81.00	80.75	80.00	730.00
R3	81.00	82.75	81.50	81.50	80.75	80.75	80.75	80.00	79.50	728.50
Total Tratamientos	243.25	249.25	244.00	244.25	241.75	244.50	242.75	241.50	239.00	2190.25
Promedio Tratamientos	81.08	83.08	81.33	81.42	80.58	81.50	80.92	80.50	79.67	

Anexo 4. Especificaciones técnicas de la cámara de Imagen Hiperespectral

Tabla 12.

Especificaciones de la cámara Pika II utilizada en la investigación

Especificaciones de la cámara Pika II	
Rango Espectral	400 -900 nm
Resolución Espectral	2,1 nm
Canales Espectrales	240
Canales Espaciales	640
Máximos cuadros por segundo	145 fps
Profundidad de Bits	12
Opciones de conexión	GigE
Requerimientos de potencia	8-30V, <2,5W
Peso	1,3
Dimensiones (cm)	9,7x16,8x6,4
Rango de temperatura	8-32 °C

Anexo 5. Caracterización hiperespectral de los granos torrefactos.

Tabla 13.

Datos de Longitud de onda en nm de la variedad catimor.

Repeticiones	Tratamientos									Total Rep.
	180 °C			190 °C			200 °C			
	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	
R1	913.10	913.10	921.96	913.10	913.10	921.96	919.74	919.74	913.10	8248.9
R2	919.74	919.74	919.74	919.74	910.88	919.74	919.74	919.74	919.74	8268.8
R3	917.52	919.74	913.10	917.52	917.52	915.31	908.67	913.10	917.52	8240.0
Total Tratamientos	2750.36	2752.58	2754.80	2750.36	2741.50	2757.01	2748.15	2752.58	2750.36	24757.70
Promedio Tratamientos	916.79	917.53	918.27	916.79	913.83	919.00	916.05	917.53	916.79	

Tabla 14.

Datos de Brillo de la variedad catimor.

Repeticiones	Tratamientos									Total Rep.
	180 °C			190 °C			200 °C			
	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	
R1	5141.67	4319.69	4111.59	4635.33	4268.85	4172.19	5241.91	3961.79	3206.76	39059.78
R2	5436.79	4261.84	3883.25	5599.95	3958.12	4159.54	4966.84	4056.84	3690.16	40013.33
R3	5751.79	4985.73	3872.70	5117.30	4080.46	4113.28	5116.16	4360.02	3606.41	41003.85
Total Tratamientos	16330.25	13567.26	11867.54	15352.58	12307.43	12445.01	15324.91	12378.65	10503.33	120076.96
Promedio Tratamientos	5443.42	4522.42	3955.85	5117.53	4102.48	4148.34	5108.30	4126.22	3501.11	

Tabla 15.*Datos de Longitud de onda en nm de la variedad caturra.*

Repeticiones	Tratamientos									Total Rep.
	180 °C			190 °C			200 °C			
	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	
R1	919.74	919.74	921.96	919.74	919.74	919.74	919.74	921.96	913.10	8275.46
R2	913.10	913.10	919.74	919.74	913.10	917.52	921.96	917.52	919.74	8255.52
R3	919.74	913.10	913.10	913.10	917.52	913.10	919.74	919.74	921.96	8251.10
Total Tratamientos	2752.58	2745.94	2754.80	2752.58	2750.36	2750.36	2761.44	2759.22	2754.80	24782.08
Promedio Tratamientos	917.53	915.31	918.27	917.53	916.79	916.79	920.48	919.74	918.27	

Tabla 16.*Datos de Brillo de la variedad caturra.*

Repeticiones	Tratamientos									Total Rep.
	180 °C			190 °C			200 °C			
	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	8 min	12 min	16 min	
R1	4288.89	4434.42	3672.15	5129.44	4069.01	4177.50	5406.39	3700.86	3458.66	38337.32
R2	5583.59	4404.81	4362.46	5156.80	4514.88	4206.24	4350.31	4401.90	4022.00	41002.99
R3	4978.19	4634.55	4084.31	4449.05	4386.02	4199.75	5215.40	4144.84	4484.07	40576.18
Total Tratamientos	14850.67	13473.78	12118.92	14735.29	12969.91	12583.49	14972.10	12247.60	11964.73	119916.49
Promedio Tratamientos	4950.22	4491.26	4039.64	4911.76	4323.30	4194.50	4990.70	4082.53	3988.24	

Anexo 6. Galería de fotografías de la investigación



Figura 11. Muestra del café pergamino, “COOP. Diamante”.



Figura 12. Muestra de café después del proceso de trillado “COOP. Diamante”.



Figura 13. Muestras de café de tostado y pesado “COOP. Diamante”.



Figura 14. Análisis organolépticos realizados en la Catación, “COOP. Diamante”.



Figura 15. Pesado de muestras “Laboratorio Taller de Tecnología de Alimentos - UNJ”



Figura 16. Medición de humedad “Laboratorio Taller de Tecnología de Alimentos - UNJ”



Figura 17. Controles de calibración antes de las tomas de imágenes hiperespectral “Laboratorio Taller de Tecnología de alimentos - UNJ”

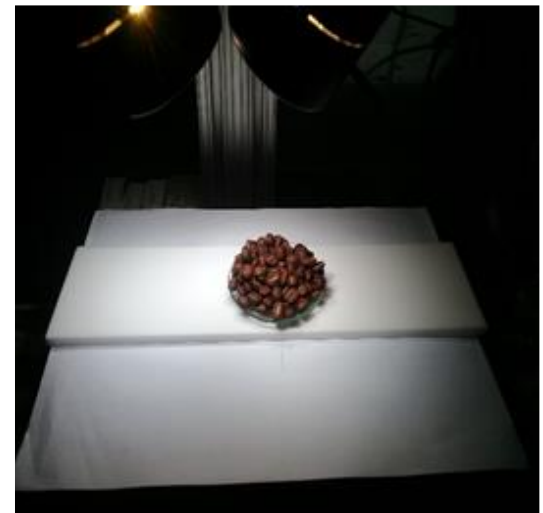


Figura 18. Toma de imágenes hiperespectral de los granos tostados “Laboratorio Taller de Tecnología de Alimentos - UNJ”