



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**MAESTRIA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**CINÉTICA DEL SECADO EN PROCESAMIENTOS PRIMARIOS (NATURALES,  
LAVADOS Y HONEY) DE CAFÉ SOBRE LA CALIDAD SENSORIAL EN TAZA.**

# **TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA**

**I.A.I KARINA MENDOZA GARNICA**

El cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, Mayo 2026



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**MAESTRIA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS**  
**NATURALES**

**CINÉTICA DEL SECADO EN PROCESAMIENTOS PRIMARIOS (NATURALES,  
LAVADOS Y HONEY) DE CAFÉ SOBRE LA CALIDAD SENSORIAL EN TAZA.**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS  
Y RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA**

**I.A.I KARINA MENDOZA GARNICA**

**COMITÉ DE TUTORES:**

**NOMBRE DEL(A) TUTOR(A) ACADÉMICO(A):**  
**DRA. MARÍA DOLORES MARIEZCURRENA BERASAIN**

**TUTORES(A) ADJUNTOS(AS):**

**DR. MARTIN RUBÍ ARRIAGA**  
**DR. GUILLERMO ASDRÚBAL VARGAS ELÍAS**

## RESUMEN

El café es uno de los productos agrícolas de mayor importancia económica y social a nivel mundial, cuya calidad final depende de diversos factores que intervienen desde el cultivo hasta la transformación del grano. El secado desempeña un papel fundamental, ya que influye directamente en la conservación de compuestos bioactivos y en el desarrollo de las características fisicoquímicas y sensoriales del producto final.

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la influencia de las condiciones de secado en invernadero sobre la calidad del café verde y su impacto posterior en el café tostado. Para ello, se consideraron diferentes parámetros del proceso, como la temperatura, la humedad relativa, la ventilación y la uniformidad en la exposición de los granos al flujo de aire caliente, así como el estado de maduración del fruto y el método de procesamiento.

Los resultados obtenidos evidenciaron que un control adecuado del secado permite alcanzar contenidos de humedad comercialmente aceptables sin comprometer la integridad estructural del grano. No obstante, velocidades de secado excesivamente rápidas pueden provocar fisuras y favorecer la pérdida de compuestos bioactivos sensibles al calor, lo que repercute negativamente en la calidad del café.

En el café tostado, las variaciones en la composición química y en las propiedades sensoriales reflejaron la interacción entre el método de procesamiento, las condiciones de secado y el perfil de tostado, destacando la importancia de un manejo integral de estas etapas. En conjunto, los resultados de este trabajo aportan información relevante para la optimización de los procesos de secado y tostado, orientada a la mejora de la calidad del café y a la conservación de sus compuestos bioactivos.

**Palabras clave:** Cinética de secado, zeolita, procesamiento del café, *Coffea arabica*, compuestos bioactivos.

## **ABSTRACT**

Coffee is one of the agricultural products of greatest economic and social importance worldwide, and its final quality depends on various factors involved from cultivation to bean processing. Drying plays a fundamental role, as it directly influences the preservation of bioactive compounds and the development of the physicochemical and sensory characteristics of the final product.

The present study aimed to evaluate the influence of greenhouse drying conditions on green coffee quality and their subsequent impact on roasted coffee. For this purpose, different process parameters were considered, including temperature, relative humidity, ventilation, and the uniformity of bean exposure to the hot air flow, as well as fruit ripeness and the processing method.

The results obtained showed that appropriate control of the drying process makes it possible to achieve commercially acceptable moisture contents without compromising the structural integrity of the beans. However, excessively high drying rates may induce cracking and promote the loss of heat-sensitive bioactive compounds, thereby negatively affecting coffee quality.

In roasted coffee, variations in chemical composition and sensory properties reflected the interaction among the processing method, drying conditions, and roasting profile, highlighting the importance of integrated management of these stages. Overall, the results of this study provide relevant information for the optimization of drying and roasting processes, aimed at improving coffee quality and preserving its bioactive compounds.

**Keywords:** Drying kinetics, zeolite, coffee processing, *Coffea arabica*, bioactive compounds.

## ÍNDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	<b>I</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>II</b>
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>II. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1 Antecedentes</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.1 Producción mundial de café: panorama global y regional</b> .....	<b>4</b>
<b>2.1.2. Importancia económica, social y ambiental del café</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. Fisiología vegetal</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.1. Aspectos taxonómicos</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.2. Semilla</b> .....	<b>6</b>
<b>2.3. Poscosecha</b> .....	<b>6</b>
<b>2.4. Proceso de beneficio</b> .....	<b>6</b>
<b>2.4.1. Cosecha</b> .....	<b>6</b>
<b>2.4.2. Clasificación</b> .....	<b>7</b>
<b>2.4.3. Flotación (clasificación por densidad)</b> .....	<b>7</b>
<b>2.4.4. Despulpado</b> .....	<b>7</b>
<b>2.5. Secado</b> .....	<b>8</b>
<b>2.5.1. Cinética de secado</b> .....	<b>8</b>
<b>2.5.2. Tipos de secado</b> .....	<b>9</b>
<b>2.6. Zeolita</b> .....	<b>10</b>
<b>2.6.1. Aplicación de secado</b> .....	<b>10</b>
<b>III. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>11</b>
<b>IV. HIPÓTESIS</b> .....	<b>13</b>
<b>V. OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>5.1. Objetivo general</b> .....	<b>13</b>
<b>5.2. Objetivos específicos</b> .....	<b>14</b>
<b>VI. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>15</b>
<b>6.1. Sitio experimental</b> .....	<b>15</b>
<b>6.2 Materiales</b> .....	<b>16</b>
<b>6.2.1 Material mineral</b> .....	<b>16</b>

6.2.1 Material Orgánico .....	17
6.3 Beneficio de café .....	17
6.3.1 Proceso húmedo (Lavados) .....	18
6.3.2 Proceso semihúmedo ( <i>Honey</i> ) .....	19
6.3.3 Proceso seco (Naturales) .....	21
6.4 Métodos .....	22
6.4.1 Medición del porcentaje de humedad mediante el método gravimétrico .....	22
6.4.2 Metodología .....	22
6.4.1.2 Análisis físicos .....	23
6.4.1.3 Densidad aparente ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) .....	24
6.4.1.4 Humedad (%) .....	25
6.4.1.5 Actividad de agua ( $a_w$ ) .....	26
6.5.1 Análisis químicos .....	27
6.5.1.1 Determinación de fenoles (método de Folin-Ciocalteu) .....	28
6.5.1.2 Determinación de fenoles totales por (método de Salem <i>et al.</i> , 2011) .....	30
6.5.1.4 Determinación de azúcares reductores (técnica DNS) .....	33
6.6 Tostado y torrefacción de café .....	35
6.7 Evaluación sensorial de café .....	36
6.8 Modelado matemático de la cinética de secado .....	38
6.9. Diseño experimental .....	40
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	42
7.1 Humedad .....	42
7.1.1 Beneficio .....	42
7.1.2 Tipo de mineral .....	47
7.1.3 Interacción .....	48
7.1.2.1 Actividad de agua ( $a_w$ ) .....	49
7.1.2.2 Beneficio .....	50
7.1.2.3 Mineral .....	51
7.1.2.4 Interacción .....	53
7.1.3.1 Densidad .....	54
7.1.3.2 Beneficio .....	55
7.1.3.3 Mineral .....	57
7.1.3.4 Interacción .....	58

7.1.4.1 Fenoles (Folin-Ciocalteu) .....	58
7.1.4.2 Beneficio .....	59
7.1.4.3 Mineral .....	61
7.1.4.4 Interacción .....	63
7.1.5.1 Fenoles (método separación de solventes).....	66
7.1.5.2 Beneficio .....	66
7.1.6.1 Saponinas .....	69
7.1.6.2 Beneficio .....	69
7.1.6.3 Mineral .....	73
7.1.6.4 Interacción .....	74
7.1.7.1 Azúcares Reductores.....	78
7.1.7.2 Beneficio .....	79
7.1.7.3 Interacción .....	81
7.1.8.1 Antioxidantes .....	83
7.1.8.2 Beneficio .....	84
7.1.8.3 Mineral .....	86
7.1.8.4 Interacción .....	87
7.1.9.1 pH.....	91
7.1.9.2 Beneficio .....	91
7.1.9.3 Interacción .....	94
7.1.10 Resultados de Color.....	96
7.1.10.1 Color a* .....	98
7.1.10.2 Color b* .....	99
7.1.10.3 Color c* y h .....	101
7.1.10.4 Color de L* .....	103
7.2.1 Resultados y discusión en café tostado.....	105
7.2.1.1 Actividad de agua ( $a_w$ ).....	108
7.2.1.2 Beneficio .....	108
7.2.1.3 Interacción .....	110
7.2.2.1 Fenoles totales (Método Folin-Ciocalteu) .....	110
7.2.2.2 Beneficio .....	111
7.2.2.3 Interacción .....	112
7.2.3.1 Fenoles (método separación de solventes).....	113

7.2.3.2 Beneficio .....	113
7.2.4.1 Saponinas .....	115
7.2.4.2 Beneficio .....	115
7.2.4.3 Interacción .....	116
7.2.5.1 Azúcares reductores .....	117
7.2.5.2 Beneficio .....	117
7.2.5.3 Interacción .....	118
7.2.6.1 Antioxidantes .....	118
7.2.6.2 Interacción .....	119
7.2.7.1 pH .....	120
7.2.7.2 Beneficio .....	120
7.2.7.3 Interacción .....	121
7.2.8.1 Resultados de color .....	122
7.2.8.2 Color a* .....	124
7.2.8.3 Color b* .....	125
7.2.8.4 Color c* y h .....	126
7.2.8.5 Color de L* .....	127
7.3.1. Resultados y discusión cinética de secado.....	128
7.3.1.1 Análisis de regresión no lineal de la cinética de secado .....	129
7.3.1.2. Curvas de velocidad de secado (dMR/dt) en función del tiempo para café procesado por los métodos natural, honey y lavado, con y sin zeolita .....	134
IX. RECOMENDACIONES .....	138
X. BIBLIOGRAFÍA.....	140

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Etapas de maduración de los frutos del café .....	7
Figura 2. Café procesado mediante el beneficio Húmedo (Lavados).....	19
Figura 3. Café procesado mediante el beneficio semihúmedo (Café Honey) .....	20
Figura 4. Café procesado mediante beneficio seco .....	21
Figura 5. Círculo cromático, para presentar las muestras de café molido verde y café tostado. ....	97
Figura 6. Círculo cromático, para presentar las muestras de café molido verde... 97	97

Figura 8. Pendiente de $\ln(MR)$ en función del tiempo y difusividad efectiva de la humedad ( $D_{eff}$ ) para los procesos de café Natural, Honey y Lavado, con y sin zeolita.....	130
Figura. 9 Relación de humedad (MR) en función del tiempo durante el secado de café lavado con y sin zeolita, y su modelado mediante las ecuaciones de Midilli, Page modificado y Newton.....	130
Figura 7. Relación de humedad (MR) en función del tiempo durante el secado de café natural con y sin zeolita, y su modelado mediante las ecuaciones de Midilli, Page modificado y Newton.....	130
Figura 11. Variación de la velocidad de secado ( $dMR/dt$ ) con y sin zeolita en función del tiempo, para el secado de café ( <i>Coffea arabica</i> L.) con beneficio lavado .....	134
Figura 12. Variación de la velocidad de secado ( $dMR/dt$ ) con y sin zeolita en función del tiempo, para el secado de café ( <i>Coffea arabica</i> L.) con beneficio honey .....	134
Figura 10. Variación de la velocidad de secado ( $dMR/dt$ ) con y sin zeolita en función del tiempo, para el secado de café ( <i>Coffea arabica</i> L.) con beneficio natural .....	134

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Resultados de los análisis (Humedad, fenoles totales, saponinas, fenoles, aw, densidad, azúcares reductores y antioxidantes) realizados a los tratamientos. ....	45
Cuadro 2. Resultados de color ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $c^*$ y h y pH) realizados a los tratamientos. ....	46
Cuadro 3. Resultados de los análisis en café tostado (Fenoles totales, saponinas, fenoles, aw, azúcares reductores y antioxidantes) realizados a los tratamientos. ....	106
Cuadro 4. Resultados de color ( $L^*$ , $a^*$ , $b^*$ , $c^*$ y h y pH) a los tratamientos. ....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación de la curva de calibración ácido gálico y agua destilada .....	29
Tabla 2. Disoluciones y concentraciones para la determinación de antioxidantes	32

Tabla 3. Preparación de soluciones de glucosa para curva de calibración .....	34
Tabla 4.Comparación del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ adj) y error estándar de estimación (SEE) de los modelos Midilli, Newton y Page modificado para el secado de café natural con y sin zeolita.....	132
Tabla 5.Comparación del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ adj) y error estándar de estimación (SEE) de los modelos Midilli, Newton y Page modificado para el secado de café honey con y sin zeolita .....	132
Tabla 6.Comparación del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ adj) y error estándar de estimación (SEE) de los modelos Midilli, Newton y Page modificado para el secado de café lavado con y sin zeolita .....	133
Tabla 7. Pendiente de $\ln(MR)$ en función del tiempo y difusividad efectiva de la humedad ( $D_{eff}$ ) para los procesos de café Natural, Honey y Lavado, con y sin zeolita.....	136

## I. INTRODUCCIÓN

En México, la producción de café representa una actividad agrícola de gran importancia económica y social, particularmente en regiones rurales donde contribuye significativamente al sustento de los productores. Durante el año 2024, la producción nacional alcanzó 1,056,306 toneladas en una superficie sembrada de 703,943 hectáreas. Los principales estados productores fueron Chiapas, Veracruz y Puebla, que aportaron el 34.7 %, 20.4 % y 18.8 % del volumen total, respectivamente (SIAP, 2024).

En contraste, el Estado de México presenta una participación menor en la producción nacional, con 480 toneladas de café verde en una superficie de 531 hectáreas, lo que representa el 0.08 %. No obstante, esta aparente baja contribución adquiere relevancia en el contexto del café de especialidad, ya que el café mexiquense ha destacado en certámenes internacionales como la Taza de Excelencia, alcanzando calificaciones superiores a los 90 puntos, lo que lo posiciona entre los de mayor calidad en el país (De Jesús *et al.*, 2019). La producción se concentra principalmente en el Distrito de Desarrollo Rural de Tejupilco, destacando municipios como Temascaltepec, Sultepec y Amatepec.

La calidad del café está determinada en gran medida por los procesos poscosecha, dentro de los cuales el beneficio constituye una etapa fundamental. Este proceso se define como el conjunto de operaciones mediante las cuales el café en estado de cereza se transforma en café verde, e incluye diferentes métodos como el húmedo (lavado), semihúmedo (*honey*) y seco (natural) (Gallardo *et al.*, 2023). Cada uno de estos métodos presenta características particulares en cuanto a la remoción

de pulpa, fermentación y secado, lo que influye directamente en el desarrollo de perfiles sensoriales diferenciados en taza. Por ejemplo, los cafés lavados suelen presentar perfiles más limpios y brillantes, mientras que los procesos honey y natural generan sabores más dulces, complejos y afrutados (Valenzuela y Luna, 2023).

Dentro de las etapas del beneficio, el secado se considera uno de los factores más críticos, ya que tiene un impacto directo en la calidad física, química y sensorial del grano. El objetivo del secado es reducir el contenido de humedad hasta niveles seguros, generalmente entre 10 y 12 %, para evitar el deterioro durante el almacenamiento. Sin embargo, un secado inadecuado puede provocar defectos importantes en la calidad del café. Contenidos de humedad superiores al 12 % favorecen el desarrollo de microorganismos y la aparición de defectos como mohos y blanqueamiento del grano, mientras que valores inferiores al 8 % pueden generar sabores indeseables, como notas amaderadas (Sandeep *et al.*, 2021).

El secado del café puede realizarse mediante métodos naturales, como el secado al sol, o mediante sistemas mecánicos que permiten un mayor control de las condiciones del proceso. El secado al sol es ampliamente utilizado por productores, especialmente en sistemas de pequeña escala, debido a su bajo costo; sin embargo, presenta limitaciones importantes relacionadas con la variabilidad de las condiciones ambientales, lo que puede generar procesos heterogéneos y afectar la calidad final del producto.

Ante estas limitaciones, se han explorado alternativas tecnológicas que permitan mejorar la eficiencia del secado y la calidad del café. Entre ellas, destaca el uso de

materiales adsorbentes como la zeolita, la cual posee la capacidad de reducir la humedad relativa del ambiente, favoreciendo la eliminación de agua del grano y mejorando las condiciones del proceso de secado (Abreu *et al.*, 2025). No obstante, aún es limitada la información sobre el efecto de este tipo de tecnologías en combinación con distintos métodos de beneficio y su impacto en la calidad sensorial del café.

En este contexto, el estudio de la cinética de secado adquiere gran relevancia, ya que permite comprender la velocidad y el comportamiento de la pérdida de humedad en función del tiempo y de las condiciones de proceso. Este análisis resulta fundamental para optimizar las etapas poscosecha y garantizar la calidad del producto final.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar la cinética del secado en diferentes procesamientos primarios del café (natural, lavado y *honey*) y analizar su efecto sobre la calidad sensorial en taza, con la finalidad de generar información que contribuya a la mejora de los procesos poscosecha y al fortalecimiento de la calidad del café producido en sistemas de pequeña escala.

## II. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFÍA

### 2.1 Antecedentes

#### 2.1.1 Producción mundial de café: panorama global y regional

La producción mundial de café se concentra principalmente en países ubicados en regiones tropicales, destacando Brasil, Vietnam y Colombia como los principales productores. De acuerdo con la Organización Internacional del Café (OIC) 2022, la producción global alcanzó aproximadamente 178 millones de sacos de 60 kg durante la campaña 2023/2024.

Las especies predominantes son *Coffea arabica* y *Coffea canephora* (robusta), siendo la primera la más cultivada y consumida a nivel mundial debido a su calidad sensorial, mientras que la segunda se caracteriza por su mayor resistencia a condiciones adversas y su alto contenido de cafeína (Organización Internacional del Café, 2024).

#### 2.1.2. Importancia económica, social y ambiental del café

El café es una de las bebidas más consumidas a nivel global y representa un cultivo estratégico en términos económicos, sociales y ambientales. Aunque existen más de 100 especies del género *Coffea*, únicamente *Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* poseen relevancia comercial.

El café arábica representa aproximadamente el 60 % de la producción mundial, se cultiva en zonas de mayor altitud y climas templados, y es altamente valorado por su calidad. Por su parte, el café robusta representa cerca del 40 % de la producción global y se adapta a climas cálidos y húmedos en altitudes menores (DaMatta & Ramalho, 2025).

La caficultura constituye una actividad clave en zonas rurales, siendo fuente de empleo e ingresos para aproximadamente cinco millones de personas, principalmente pequeños productores con superficies de entre 1 y 3 hectáreas. Además, el cultivo suele establecerse en sistemas agroforestales, los cuales favorecen la conservación del suelo, la biodiversidad y los recursos hídricos, generando beneficios ambientales relevantes (Valenzuela y Luna, 2023).

## **2.2. Fisiología vegetal**

La fisiología vegetal permite comprender los procesos morfológicos, fenológicos y bioquímicos que ocurren en las plantas, así como su interacción con el ambiente.

Las plantas de café presentan una morfología variable, desde arbustos hasta árboles de mayor tamaño, con madera densa y resistente. Sus inflorescencias son pareadas y sus flores hermafroditas, con corolas blancas o ligeramente rosadas. El fruto del café se clasifica como una drupa indehiscente que generalmente contiene dos semillas, las cuales constituyen el producto comercial (Unigarro *et al.*, 2025).

### **2.2.1. Aspectos taxonómicos**

A finales del siglo XIX se identificaron diversas especies del género *Coffea* en los bosques tropicales africanos, las cuales fueron clasificadas en cuatro grandes grupos: *Argocoffea*, *Paracoffea*, *Mascarocoffea* y *Eucoffea*.

Este último grupo incluye los cafetos de importancia económica y se subdivide en cinco subsecciones: *Pachycoffea*, *Nanocoffea*, *Melanocoffea*, *Mozambicoffea* y *Erythrocoffea*. La clasificación se basa en características como la morfología foliar, tamaño de la planta, color del fruto y distribución geográfica (Unigarro *et al.*, 2025).

### **2.2.2. Semilla**

La semilla del café cumple una doble función: garantizar la reproducción de la especie y constituir el principal producto comercial. Su formación inicia tras la fecundación, dando lugar a un fruto que generalmente contiene dos semillas.

La madurez fisiológica se alcanza entre los 200 y 220 días posteriores a la fecundación, momento en el cual adquiere la capacidad de germinar (Unigarro *et al.*, 2025).

### **2.3. Poscosecha**

El procesamiento poscosecha del café incluye clasificación, flotado, despulpado, fermentación, lavado, secado, trillado, almacenamiento y tostado.

Entre estas etapas, el secado es crítico, ya que reduce el contenido de humedad a  $\leq 12\%$ , asegurando estabilidad. Sin embargo, métodos tradicionales como el secado al sol presentan limitaciones como dependencia climática, contaminación y falta de uniformidad (Soeswanto *et al.*, 2021).

### **2.4. Proceso de beneficio**

El beneficio transforma el fruto en café verde mediante métodos lavado, honey o natural, los cuales influyen directamente en la calidad sensorial (Caporaso y Sablani, 2022).

#### **2.4.1. Cosecha**

La cosecha manual permite seleccionar frutos maduros, aunque implica altos costos. Los métodos mecánicos aumentan eficiencia, pero reducen uniformidad. Es fundamental procesar rápidamente el café tras la cosecha para evitar deterioro (Melo *et al.*, 2019).

### 2.4.2. Clasificación

La calidad depende del grado de madurez los cuales se pueden observar mediante el color (véase Fig. 1), defectos y daño por insectos. La selección adecuada elimina frutos indeseables que afectan la calidad en taza (Huang *et al.*, 2025).

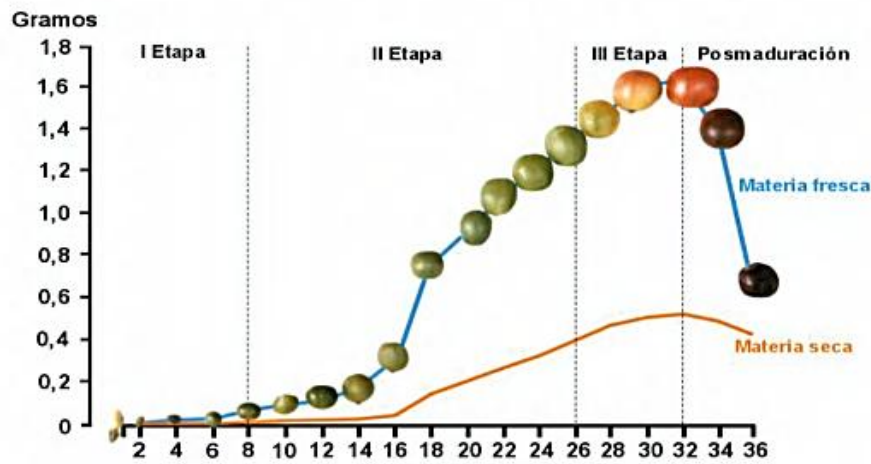


Figura 1 Etapas de maduración de los frutos del café

### 2.4.3. Flotación (clasificación por densidad)

El flotado es una etapa clave que permite separar frutos según su densidad mediante inmersión en agua. Los frutos defectuosos, secos o dañados flotan y son removidos, mientras que los frutos sanos se hunden.

Este proceso mejora significativamente la calidad del café, ya que elimina impurezas y reduce la variabilidad del lote, influyendo positivamente en el perfil sensorial final (Caporaso y Sablani, 2022).

### 2.4.4. Despulpado

El despulpado elimina la pulpa y expone el mucílago, el cual contiene azúcares y una microbiota (levaduras y bacterias) que influyen en la fermentación y desarrollo sensorial (Bruyn *et al.*, 2022).

## 2.5. Secado

El secado es una operación de transferencia de calor y masa que reduce la humedad del grano.

Factores clave:

- Temperatura: temperaturas altas ( $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) aceleran el secado, pero pueden degradar compuestos y afectar la calidad del café; en cambio, temperaturas bajas ( $< 20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) con alta humedad relativa lo ralentizan y favorecen el crecimiento microbiano (Debona *et al.*, 2022).
- Humedad relativa: Una menor humedad relativa del aire (50–60 %) aumenta su capacidad para absorber la humedad del grano, favoreciendo el proceso de secado (Esteban *et al.*, 2023).
- Flujo de aire: A mayor superficie de contacto entre el grano y el aire (capas de 1–5 cm) favorece la eliminación del vapor de agua de la superficie del grano (Esteban *et al.*, 2023).

Condiciones inadecuadas favorecen crecimiento microbiano como *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Alternaria* y *Cladosporium* y defectos sensoriales (Kaur, 2022).

Además, el secado influye directamente en la formación de compuestos volátiles responsables del aroma y sabor del café, por lo que un control adecuado del proceso es esencial para mantener la calidad sensorial (Sandeep *et al.*, 2021).

### 2.5.1. Cinética de secado

La cinética de secado analiza la velocidad de pérdida de humedad en función del tiempo y condiciones del proceso.

Se modela matemáticamente para:

- Optimizar tiempos
- Mejorar eficiencia
- Controlar calidad

(Man *et al.*, 2024)

La cinética permite relacionar el comportamiento de secado con cambios físicos y químicos del grano, siendo fundamental en estudios de calidad sensorial.

### **2.5.2. Tipos de secado**

Se emplean métodos como:

- Natural
- Lecho fluidizado
- Parabólico
- Túnel solar
- Convectivo
- Microondas
- Vacío
- Rotativo
- Liofilización

Cada uno presenta diferencias en:

- Eficiencia
- Costo
- Impacto ambiental
- Efecto en calidad

Los métodos de secado influyen directamente en la cinética de eliminación de humedad y, por ende, en la calidad final del café, especialmente en términos sensoriales (Osorio *et al.*, 2022).

## **2.6. Zeolita**

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos e hidratados que contienen cationes alcalinos y alcalinotérreos con alta capacidad de adsorción de agua, lo que las hace útiles en procesos de secado (Pérez *et al.*, 2022).

Su eficiencia depende del tamaño de partícula; estas pueden clasificarse en diferentes rangos, desde tamaños superiores a 1 mm hasta polvos finos menores de 100  $\mu\text{m}$ , siendo estos últimos los más efectivos (Mubeen *et al.*, 2024).

La zeolita se forma en ambientes geológicos, principalmente en tobas (depósitos de ceniza volcánica), a partir de procesos de alteración hidrotermal y deposición en medios lacustres o marinos. Conserva su estructura cristalina y propiedades hasta 700–800 °C, y su vida útil, dependiente de las condiciones operativas, puede superar los 5 años. En México, destacan yacimientos en Oaxaca y Sonora (Guerra *et al.*, 2021).

### **2.6.1. Aplicación de secado**

La zeolita mejora la velocidad de secado al reducir la humedad relativa del ambiente. Ejemplo: En maíz, aumentó la velocidad de secado, aunque su exceso reduce eficiencia del sistema (Zhanyong y Zhonghua, 2011).

Sin embargo, en café existe aún limitada evidencia sobre su efecto en la cinética de secado y en la calidad sensorial, lo que justifica la necesidad de investigaciones en este campo.

### III. JUSTIFICACIÓN

A pesar de los más de 76 años de avances tecnológicos y científicos en la industria del café, persisten deficiencias significativas en el control de los procesos poscosecha, particularmente en la etapa de secado, la cual es considerada una de las más críticas debido a su impacto directo en la calidad física, química y sensorial del grano. Estas limitaciones se traducen en la aparición de defectos, heterogeneidad en el contenido de humedad y variabilidad en la calidad en taza, lo que genera pérdidas económicas para los caficultores y una subutilización de mercados de alto valor, como el café de especialidad (Osorio *et al.*, 2022).

El secado, al ser una operación unitaria que involucra fenómenos simultáneos de transferencia de calor y masa, influye directamente en la cinética de eliminación de humedad del grano y en la conservación de compuestos precursores del aroma y sabor. Un control inadecuado de esta etapa puede alterar la formación de compuestos volátiles, afectando negativamente el perfil sensorial del café. En este sentido, el estudio de la cinética de secado resulta fundamental para comprender y optimizar los procesos poscosecha, particularmente cuando se consideran diferentes métodos de beneficio como el natural, lavado y honey, los cuales generan condiciones distintas de fermentación y secado que impactan la calidad final del producto.

En este contexto, se propone una investigación comparativa entre el secado tradicional y el secado asistido con zeolita en los principales métodos de beneficio. La zeolita, debido a su alta capacidad de adsorción de humedad, representa una alternativa tecnológica con potencial para mejorar la eficiencia del secado, reducir

la variabilidad del proceso y favorecer la conservación de la calidad sensorial del café. Sin embargo, como se evidenció en la revisión de literatura, existe una limitada cantidad de estudios que evalúen el efecto de este material en la cinética de secado del café y su relación con la calidad en taza, lo que constituye un vacío científico relevante.

A nivel regional, en el Estado de México, particularmente en el municipio de Temascaltepec, no se han realizado estudios que analicen el impacto del uso de zeolita en el proceso de secado del café. Esta región presenta un alto potencial para la producción de café de especialidad, debido a sus condiciones agroclimáticas favorables, que incluyen temperaturas medias anuales entre 18 y 22 °C, precipitaciones de 800 a 1,600 mm y altitudes cercanas a los 2,100 m s. n. m. Estas características, junto con su ubicación geográfica (longitud -99° 97' 11" y latitud 19° 02' 81"), favorecen el desarrollo de perfiles sensoriales diferenciados, lo que ha sido reconocido en certámenes nacionales e internacionales como la Taza de Excelencia (Scamilla, 2018).

La ausencia de investigaciones en esta región sobre tecnologías innovadoras de secado, como el uso de zeolita, evidencia la necesidad de generar conocimiento aplicado que permita mejorar los procesos poscosecha y fortalecer la calidad del café producido. En este sentido, la presente investigación adquiere relevancia al integrar el análisis de la cinética de secado con la evaluación de la calidad sensorial en diferentes métodos de beneficio, lo que permitirá aportar información científica que contribuya a la optimización de los procesos y a la toma de decisiones en la producción cafetalera.

Asimismo, la vinculación con productores locales y la implementación de alternativas tecnológicas accesibles pueden generar beneficios significativos, no solo en términos de mejora de la calidad del producto, sino también en el incremento del valor comercial del café. De esta manera, el estudio contribuye al fortalecimiento de la cadena productiva del café en Temascaltepec, promoviendo sistemas más eficientes, sostenibles y orientados a mercados de mayor valor agregado.

#### **IV. HIPÓTESIS**

El uso de zeolita en el proceso de secado del café incrementa la eficiencia del proceso al reducir el tiempo de secado en comparación con el método tradicional, sin afectar negativamente las características físicas, químicas y la calidad sensorial en taza, en los distintos procesos primarios de beneficio (natural, lavado y *honey*).

#### **V. OBJETIVOS**

##### **5.1. Objetivo general**

Determinar el efecto del uso de zeolita en el proceso de secado del café, en los distintos procesos primarios de beneficio (natural, lavado y *honey*), mediante la evaluación comparativa con el secado tradicional bajo condiciones controladas, analizando la cinética de secado (tiempo y velocidad de eliminación de humedad) y su relación con la calidad sensorial en taza, con la finalidad de identificar mejoras en la eficiencia del proceso y en la calidad del producto final.

## 5.2. Objetivos específicos

1. Determinar las propiedades químicas (antioxidantes, compuestos fenólicos, saponinas y azúcares) y físicas (defectos del grano, pH, actividad de agua, humedad y densidad) del café procesado, mediante análisis de laboratorio estandarizados, para evaluar su relación con la calidad final del producto y su posible variación en función del método de secado aplicado.

2. Estandarizar la metodología de secado natural en zarandas con y sin la incorporación de zeolita, mediante el control de variables como temperatura, humedad relativa, espesor de capa y frecuencia de volteo en condiciones de invernadero de la FCAgri de la UAEMex, con la finalidad de asegurar la reproducibilidad del proceso y permitir la comparación entre tratamientos.

3. Cinética de secado: Analizar la cinética de secado del café en los diferentes métodos de beneficio (natural, lavado y *honey*), con y sin zeolita, mediante el monitoreo del contenido de humedad en función del tiempo, para determinar la velocidad de secado, el tiempo requerido para alcanzar la humedad final y la eficiencia del proceso.

4. Evaluar la calidad sensorial en taza del café obtenido bajo los diferentes tratamientos de secado, mediante análisis sensorial estandarizado, para determinar el efecto del uso de zeolita sobre atributos como aroma, sabor, acidez, cuerpo y puntuación global.

## VI. MATERIALES Y MÉTODOS

### 6.1. Sitio experimental

En la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, se realizó una investigación sobre el secado de café en uno de sus invernaderos. En el mes de abril del 2024, se realizó la cosecha de 108 kg de café variedad Caturra (rojo), originario de Temascaltepec, Estado de México, que será beneficiado mediante un protocolo adaptado al tipo de café deseado (Naturales, lavados y *honey*), que incluye flotación, despulpado, fermentación y secado, con el objetivo de alcanzar una humedad óptima del 11-12 % para su almacenamiento y posterior tostado (IICA, 2020).

El café se colocó sobre zarandas de madera de 60x80 cm, equipadas con un fondo de malla sombra de una apertura 5x5 mm, las cuales se colocaron en mesas de concreto cubiertas con plástico dentro de un invernadero de cristal con una humedad relativa en un rango de 50 % y 60 % y temperaturas en un rango entre 30 y 45 °C, condiciones adecuadas para un secado uniforme en café (Erskine *et al.*, 2022). En el espacio entre el plástico y el fondo de malla sombra (5 cm) de las zarandas se colocó la zeolita en una dosis de 2.88 Kg y en una relación de adición de 80 % calculado como indica Siguencia, (2013).

Se realizaron los análisis químicos en granos de café verde y tostado como (antioxidantes Trolox/mL, azúcares por el método del ácido 3,5-DINITROSALICÍLICO (g/L), fenoles totales y saponinas por separación de solventes (mg EAG/ml<sup>-1</sup>) y fenoles por Folin-Ciocalteu (mg g<sup>-1</sup>). Además de análisis físicos en café verde (defectos categoría 1 y 2, densidad (kg/m<sup>3</sup>), actividad de agua ( $a_w$ ) con

un medidor HygroPalm HP23-AW-SET-40, ROTRONIC®, color utilizando un espectrofotómetro portátil MiniScan EZ (HunterLab, Reston, VA, USA), bajo iluminante estándar D65 y luz difusa no polarizada, con resultados expresados en el espacio de color CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) (Anokye *et al.*, 2025). Aproximadamente 8 g de muestra molida (200  $\mu\text{m}$ ) de café verde y tostado se colocaron en el cilindro de vidrio óptico para la medición. El equipo fue calibrado previamente mediante patrones blanco y negro y las determinaciones se realizaron por triplicado para garantizar la precisión y reproducibilidad. El análisis de humedad se realizó de acuerdo con la metodología de la SCA, (2023).

El tostado y evaluación sensorial, se llevó a cabo en el laboratorio de catación de la Asociación Mexicana de la Cadena productiva del Café A.C., (AMECAFE). Adicionalmente para describir la cinética de secado, los datos experimentales fueron ajustados a modelos matemáticos comúnmente utilizados en procesos de deshidratación, como los modelos de Newton, Page y Midilli. La variable dependiente fue la relación de humedad (MR), calculada a partir del contenido de humedad en función del tiempo. Los parámetros de cada modelo fueron estimados mediante regresión no lineal utilizando el software, SigmaPlot 12.0. Seleccionando el modelo que mejor representó el comportamiento experimental.

## **6.2 Materiales**

### **6.2.1 Material mineral**

Se utilizó zeolita natural tipo clinoptilolita purificada (PURIKOR®, PKZEOLITA) como material adsorbente auxiliar durante el proceso de secado. Las especificaciones técnicas del producto fueron un tamaño de partícula promedio de

1.18 mm (malla 16), con porosidad del lecho del 35 %, diámetro de poro en el rango de 0.3 a 0.8 nm, densidad aparente de  $756 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  y estabilidad térmica máxima de  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , este material se sometió a un proceso de deshumidificación en una estufa de aire forzado durante 24 h hasta alcanzar peso constante (Lindberg Blue M BF51748A-1 Moldatherm Box Horno 1.99L,  $100^\circ\text{C}$  a  $1000^\circ\text{C}$ , 120VAC). La estructura microporosa de la clinoptilolita facilita la transferencia de masa y la adsorción selectiva de agua, manteniendo estabilidad estructural durante el secado (Mubeen *et al.*, 2024).

### **6.2.1 Material Orgánico**

En abril de 2024 se recolectaron 108 kg de café (*Coffea arabica* cv. Caturra rojo), procedente de Temascaltepec, Estado de México, destinado a su procesamiento mediante distintos métodos de beneficiado.

### **6.3 Beneficio de café**

El procesamiento del café es crucial para determinar sus características sensoriales y de calidad. Existen tres métodos primarios de procesamiento: *Honey*, lavados y naturales, cada uno con sus propias particularidades y efectos sobre el grano (FAO, 2022). Durante el proceso de secado, es esencial realizar una manipulación periódica del café para asegurar una distribución homogénea del calor y una evaporación uniforme de la humedad, optimizando así el proceso de secado y minimizando el riesgo de defectos en el grano (FAO, 2022).

De manera general, los tres métodos compartieron una secuencia operativa que incluyó cosecha selectiva, evaluación de madurez, flotado, despulpado (según el

método), fermentación (cuando aplicó), lavado (cuando aplicó), secado, almacenamiento (reposo) y trilla.

Durante el secado, se realizó la remoción periódica del grano para garantizar gradientes térmicos homogéneos y una adecuada transferencia de masa, favoreciendo la evaporación uniforme de la humedad y reduciendo la incidencia de defectos, en concordancia con lo reportado por la FAO (2022).

### **6.3.1 Proceso húmedo (Lavados)**

La cosecha se realizó de forma selectiva, recolectándose frutos en estado óptimo de maduración. La calidad de la materia prima se evaluó mediante la medición de sólidos solubles totales (°Brix) con refractómetro, asegurándose valores entre 18 y 24, rango considerado adecuado por Huang *et al.* (2025). Posteriormente, se efectuó el flotado en agua para separar frutos vanos, inmaduros o dañados. La relación agua-café se controló volumétricamente (por ejemplo, 3,6 kg de café cereza en un contenedor de 20 L con 16,4 L de agua). Los frutos descartados se cuantificaron gravimétricamente para fines de control.

El despulpado se realizó mecánicamente, eliminándose el exocarpio y mesocarpio, y obteniéndose granos en estado pergamino con mucílago adherido, como describieron Gallardo *et al.* (2023). Posteriormente, los granos se transfirieron a tanques de fermentación de acero inoxidable con agua potable, cuyo pH inicial se ajustó entre 6,0 y 7,0. Los recipientes se mantuvieron cubiertos con malla, permitiendo la ventilación y evitando la contaminación externa. La fermentación se llevó a cabo durante un periodo de 12 a 24 h, midiéndose el pH al inicio y al final del proceso como indicador de la actividad microbiológica y degradación del mucílago, de acuerdo con Hernández *et al.* (2022).

Finalizada la fermentación, se realizó el lavado manual mediante fricción, empleándose aproximadamente 4,2 L de agua potable por kilogramo de café para eliminar completamente el mucílago residual. Posteriormente, los granos se dejaron escurrir durante 4 h. El secado se efectuó en zarandas durante aproximadamente 7 días, hasta alcanzar un contenido de humedad entre 10 y 12 %, realizándose volteos periódicos para asegurar uniformidad en la deshidratación.

Una vez seco, el café se almacenó durante aproximadamente 45 días, permitiendo la estabilización higroscópica del grano y el equilibrio de la humedad interna, lo que favoreció el desarrollo del perfil sensorial. Finalmente, se realizó la trilla mecánica para remover el pergamino y obtener café verde, procurando minimizar daños estructurales en el grano, en concordancia con lo reportado por Pivaral y Cruz (2018). En la Figura 2, se observa el café procesado mediante beneficio húmedo.



*Figura 2. Café procesado mediante el beneficio Húmedo (Lavados)*

### **6.3.2 Proceso semihúmedo (*Honey*)**

El proceso semihúmedo siguió la misma secuencia operativa descrita para el método lavado hasta la etapa de despulpado. La diferencia fundamental consistió

en la ausencia de fermentación controlada y de lavado posterior, conservándose el mucílago adherido al grano. Tras el despulpado, los granos se distribuyeron inmediatamente sobre zarandas para su secado, con el fin de evitar fermentaciones no controladas. La presencia de mucílago incrementó la actividad microbiológica potencial, por lo que el control de temperatura y humedad resultó determinante para prevenir defectos, tal como indicaron Hernández *et al.* (2022).

El secado se realizó bajo condiciones similares a las del proceso lavado, ajustándose la frecuencia de volteo para evitar la aglomeración de los granos debido al contenido de azúcares. Posteriormente, el café se almacenó durante aproximadamente 45 días y se sometió a trilla mecánica bajo las mismas condiciones descritas previamente, conforme a Pivaral y Cruz (2018). Como control adicional, el contenido de humedad se determinó mediante higrómetro (AgraTronix Coffee Tester modelo 08150). En la figura 3 se observa el café procesado mediante beneficio semihúmedo



Figura 3. Café procesado mediante el beneficio semihúmedo (Café Honey)

### 6.3.3 Proceso seco (Naturales)

El proceso seco siguió las etapas iniciales del método lavado hasta el flotado. La principal diferencia consistió en la ausencia de despulpado, secándose el fruto completo. Después del flotado, los frutos se distribuyeron en zarandas en una sola capa para su secado, el cual se prolongó aproximadamente durante 20 días hasta alcanzar un contenido de humedad de 10 a 12 %. Durante este periodo, se realizaron volteos periódicos para asegurar uniformidad y evitar fermentaciones indeseadas. Una vez seco, el café se almacenó durante aproximadamente 45 días para su estabilización. Posteriormente, se realizó la trilla mecánica, en la cual se eliminaron las capas secas del fruto hasta obtener el grano verde, en concordancia con Pivaral y Cruz (2018). La figura 4, muestra el Café procesado mediante beneficio seco (natural).



*Figura 4. Café procesado mediante beneficio seco*

## **6.4 Métodos**

### **6.4.1 Medición del porcentaje de humedad mediante el método gravimétrico**

El método gravimétrico en café determina la masa de sólidos mediante pesaje antes y después de un secado controlado, incluyendo muestreo, preparación y análisis de datos. Destaca por su precisión y reproducibilidad, siendo clave en el control de calidad y la evaluación fisicoquímica del café (Oliveros *et al.*, 2013).

### **6.4.2 Metodología**

1. Registrar el peso del café cada 12 h utilizando una balanza analítica, con el fin de monitorear el proceso de secado. Establecer la hora de inicio como punto de referencia (tiempo cero) y determinar la duración del secado hasta alcanzar un contenido de humedad en el rango de 10–12 %.
2. Colocar la canastilla sobre la balanza analítica y tarar el equipo para excluir el peso del recipiente, asegurando una medición precisa del peso del café.
3. Seleccionar café de alta calidad, verificando que los granos sean íntegros, libres de defectos visibles y contaminantes, y colocar la muestra en la canastilla hasta alcanzar un peso de 200 g.
4. Ubicar la canastilla con la muestra sobre la zaranda, asegurando que el área circundante se encuentre despejada para evitar el contacto con superficies externas que puedan interferir con el proceso de secado.
5. Mover el café periódicamente, al menos cada 3–4 h, con el objetivo de garantizar una distribución uniforme del aire y una evaporación homogénea de la humedad; aplicar este procedimiento tanto al café dispuesto en las zarandas como al contenido en la canastilla.

6. Asignar una canastilla independiente a cada muestra o tratamiento para facilitar el pesaje y la comparación de resultados.
7. Registrar el peso de cada muestra cada 12 h, con el fin de monitorear la pérdida de humedad y asegurar la consistencia del proceso de secado.
8. Incrementar la frecuencia de monitoreo cuando el peso de la muestra en la canastilla descienda a aproximadamente 120 g, debido al aumento en la velocidad de pérdida de humedad en esta etapa, con el fin de evitar el sobresecado y asegurar que el café alcance el contenido de humedad deseado de manera uniforme.
9. Finalizar el proceso de secado cuando el peso de la muestra alcance entre 104 y 105 g, lo cual corresponde a un contenido de humedad en el rango de 10–12 %, considerado óptimo para garantizar la estabilidad del grano durante el almacenamiento y un perfil sensorial adecuado (Oliveros, 2013).

#### **6.4.1.2 Análisis físicos**

Se realizó la evaluación física del café verde conforme a la metodología establecida por la *Specialty Coffee Association* (SCA, 2023).

##### *Metodología:*

Clasificar los defectos identificados en dos categorías.

1. Defectos de categoría 1: grano negro, grano agrio, cereza seca, daño por hongos, materia extraña y daño grave por insectos.

2. Defectos de categoría 2: grano negro parcial, grano agrio parcial, presencia de pergamino, flotador, grano inmaduro, averanado, concha, grano partido, mordido o cortado, cascarilla y daño leve por insectos.

*Metodología:*

1. Preparación de Muestras: Se seleccionó y preparo una muestra representativa de café verde, asegurando su limpieza y secado previo para eliminar impurezas.
2. Pesaje: Se pesó una cantidad específica de café (300 g) utilizando una balanza analítica calibrada, registrando el peso exacto.
3. Inspección Visual: Se examinaron los granos bajo luz adecuada para identificar defectos físicos (roturas, manchas), de color (descoloraciones), y de forma (irregularidades). Se clasifico y se contaron los defectos según su categoría.
4. Evaluación Sensorial: Se llevó a tostar y moler el café para una catar y evaluar el perfil sensorial del café, identificando defectos en sabor (amargor, acidez no deseada) y aroma (humedad, rancidez), utilizando una tabla estandarizada de defectos.
5. Registro de Datos: Se documentaron los tipos y cantidades de defectos, así como los resultados sensoriales, en una hoja de registro estandarizada (SCA, 2023).

**6.4.1.3 Densidad aparente ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )**

Se determinó la densidad aparente del café verde conforme la norma NMX-F-593-SCFI-2013.

*Metodología:*

1. Seleccionar una muestra representativa de café verde, asegurando su homogeneidad y ausencia de impurezas visibles.
2. Llenar un recipiente de volumen conocido con la muestra, sin ejercer presión o compactación sobre los granos, con el fin de conservar su arreglo natural.

3. Nivelar la superficie del café en el recipiente para evitar excedentes o vacíos que alteren la medición.
4. Pesar el recipiente con la muestra utilizando una balanza analítica calibrada.
5. Registrar el peso de la muestra y el volumen del recipiente.
6. Calcular la densidad aparente como la relación entre la masa del café y el volumen ocupado, expresando el resultado en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , conforme a lo establecido en la norma.

#### **6.4.1.4 Humedad (%)**

Se determinó el contenido de humedad del café conforme a la metodología descrita en la norma NMX-F-083-1986.

##### *Metodología:*

1. Seleccionar una muestra representativa de café verde previamente homogenizada.
2. Pesar una cantidad conocida de la muestra en un recipiente previamente secado y tarado.
3. Colocar la muestra en una estufa de secado a temperatura controlada, de acuerdo con lo establecido en la norma, hasta alcanzar peso constante.
4. Retirar la muestra de la estufa y enfriar en un desecador para evitar la absorción de humedad ambiental.
5. Pesar nuevamente la muestra seca utilizando una balanza analítica calibrada.
6. Calcular el contenido de humedad como la pérdida de peso de la muestra respecto a su masa inicial, expresando el resultado en porcentaje (%), conforme a la metodología establecida en la norma.

#### **6.4.1.5 Actividad de agua ( $a_w$ )**

Se determinó la actividad de agua ( $a_w$ ) del café utilizando un medidor HygroPalm HP23-AW-SET-40 (ROTRONIC®).

*Metodología:*

1. Seleccionar una muestra representativa de café verde, asegurando su homogeneidad y ausencia de contaminantes.
2. Colocar la muestra en el recipiente de medición del equipo, evitando compactarla para no alterar la distribución de la humedad.
3. Calibrar el equipo previamente conforme a las especificaciones del fabricante, utilizando estándares de referencia si es necesario.
4. Introducir la muestra en la cámara de medición y esperar hasta que el equipo alcance condiciones de equilibrio higroscópico.
5. Registrar el valor de actividad de agua ( $a_w$ ) mostrado por el equipo una vez estabilizada la lectura.
6. Realizar las mediciones por triplicado para garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados.

#### **6.4.1.6. Determinación del color**

Se determinó el color del café utilizando un espectrofotómetro portátil MiniScan EZ (HunterLab, Reston, VA, USA).

*Metodología:*

1. Seleccionar una muestra representativa de café verde o tostado y molerla hasta obtener un tamaño de partícula uniforme (aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ ), con el fin de asegurar condiciones homogéneas de medición.

2. Colocar aproximadamente 8 g de muestra en el cilindro de vidrio óptico del equipo, asegurando una superficie uniforme y sin espacios vacíos.
3. Calibrar el espectrofotómetro previamente mediante patrones estándar blanco y negro, conforme a las especificaciones del fabricante.
4. Realizar las mediciones bajo iluminante estándar D65 y luz difusa no polarizada.
5. Registrar los valores de color en el espacio CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ).
6. Repetir las determinaciones por triplicado para garantizar la precisión y reproducibilidad de los resultados.

### **6.5.1 Análisis químicos**

En primera instancia, se llevó a cabo la preparación de los extractos a partir de muestras de café verde y tostado, los cuales fueron utilizados para los análisis químicos posteriores. La cuantificación de fenoles totales se realizó en el Laboratorio de Calidad de los Productos Agropecuarios de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, empleando el método de Folin-Ciocalteu (Arizmendi *et al.*, 2016), y expresando los resultados en miligramos de ácido gálico equivalente por mililitro ( $\text{mg GAE}\cdot\text{mL}^{-1}$ ). La determinación de azúcares reductores se llevó a cabo mediante el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), conforme a lo descrito por Burgos (2020). De manera complementaria, se evaluaron fenoles y saponinas mediante el método de extracción descrito por Salem *et al.* (2011), mientras que la actividad antioxidante del café se determinó utilizando el método ABTS propuesto por Borrelli *et al.* (2002). La preparación de los extractos se llevó a cabo de la siguiente forma:

1. Obtener el material vegetal de café a partir de la finca ubicada en Temascaltepec, Estado de México.

2. Moler la muestra utilizando un molino eléctrico (General Electric, modelo 5XBG00G), empleando un tamiz de 20  $\mu\text{m}$ , hasta obtener un polvo homogéneo, con el fin de facilitar la extracción de los compuestos de interés.
3. Pesar 6.25 g de muestra molida y adicionar 50 mL de solvente etanol absoluto/agua destilada (50 % v/v; 25 mL de etanol absoluto y 25 mL de agua destilada).
4. Transferir la mezcla a frascos ámbar de 100 mL y mantenerla en maceración durante 72 h bajo agitación constante a 200 rpm en un agitador orbital (Joanlab Os-20pro, rango 40–200 rpm), en ausencia de luz, con el fin de minimizar la degradación de compuestos sensibles a la radiación.
5. Centrifugar los extractos en tubos de polipropileno de 50 mL a 10,000 rpm y 4 °C, una vez finalizado el periodo de maceración.
6. Recuperar el sobrenadante y transferirlo a frascos ámbar de 50 mL.
7. Almacenar los extractos en refrigeración hasta su posterior uso en los análisis correspondientes.

#### **6.5.1.1 Determinación de fenoles (método de Folin-Ciocalteu)**

1. Preparar la curva de calibración mediante la pesada de carbonato de sodio al 1.5 % y aforar a 10 mL con agua destilada, así como preparar una solución de ácido gálico al 0.1 % y aforar a 25 mL con agua destilada.
2. Homogeneizar las soluciones utilizando un agitador tipo vortex (Vortex Genie 2) durante 3 min para asegurar la completa disolución de los reactivos.
3. Preparar las diluciones de la curva de calibración mediante la mezcla de ácido gálico y agua destilada en las proporciones indicadas en la Tabla 1. En ella se

presenta la relación de ácido gálico y agua destilada utilizada para la elaboración de la curva de calibración.

**Tabla 1. Relación de la curva de calibración ácido gálico y agua destilada**

<b>Ácido Gálico (mL)</b>	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
<b>Agua Destilada (mL)</b>	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0

En la tabla No. 1 se presenta la relación de ácido gálico y agua destilada para la realización de la curva de calibración.

3. Diluir las muestras de café colocando 120  $\mu$ L de extracto en 10 mL de agua destilada dentro de tubos plásticos.
4. Agitar cada muestra durante 1 min para asegurar su homogeneización.
5. Transferir las muestras diluidas a viales limpios para su análisis.
6. Adicionar los reactivos en el siguiente orden utilizando micropipetas:
  - 75  $\mu$ L de reactivo de Folin-Ciocalteu
  - 120  $\mu$ L de muestra
  - 1005  $\mu$ L de agua destilada
  - 300  $\mu$ L de carbonato de sodio al 0.1 %
7. Homogeneizar la mezcla y dejar reposar durante 2 h a temperatura ambiente para el desarrollo de la reacción.
8. Medir la absorbancia de cada muestra en un espectrofotómetro UV-VIS a una longitud de onda de 765 nm.

### **6.5.1.2 Determinación de fenoles totales por (método de Salem *et al.*, 2011)**

1. Colocar las cajas Petri en un incubador (LUZEREN DPH9082) a 50 °C durante 1 h hasta alcanzar peso constante y registrar los pesos iniciales (Pi).
2. Adicionar en un embudo de separación (KIMAX KIMBLE, 250 mL) 10 mL de acetato de etilo, 10 mL de muestra (extracto) y 10 mL de agua destilada.
3. Agitar la mezcla durante 1 min y dejar reposar durante 30 min hasta permitir la formación de dos fases.
4. Recuperar la fase inferior en un vaso de precipitado, correspondiente a la fracción que contiene saponinas, y transferir la fase superior (fase orgánica, correspondiente a fenoles totales) a cajas Petri previamente llevadas a peso constante.
5. Transferir nuevamente el contenido del vaso de precipitado al embudo de separación y adicionar 10 mL de N-butanol.
6. Agitar durante 1 min y dejar reposar durante 30 min para permitir la separación de fases.
7. Recuperar la fase inferior (fase acuosa) en un vaso de precipitado y medir su volumen.
8. Transferir la fase superior (correspondiente a saponinas) a otra caja Petri previamente llevada a peso constante.
9. Secar las muestras en campana de flujo laminar durante 24 h hasta alcanzar peso constante.
10. Calcular la concentración de fenoles totales y saponinas a partir de los pesos finales obtenidos para cada fase.

### **6.5.1.3 Determinación de antioxidantes y curva de calibración (método de Borrelli *et al.*, 2002)**

Los antioxidantes en el café son compuestos bioactivos capaces de neutralizar especies reactivas de oxígeno (ROS) y radicales libres, incluyendo polifenoles (ácidos clorogénicos y flavonoides) y vitamina E. Su concentración puede modificarse durante el tostado, influyendo en la capacidad antioxidante, propiedades sensoriales y potenciales beneficios a la salud (Rioja *et al.*, 2018).

#### **Material**

- Reactivo Trolox (30 mg)
- Reactivo ABTS (38.41 mg)
- Persulfato de potasio (33.075 mg)
- Solvente metanol (10 mL)
- Micropipetas de 20, 200, 500 y 1000  $\mu$ L
- Tubos cubiertos con aluminio

#### **Metodología**

1. Pesar 6.25 g de muestra de café y colocar en frascos ámbar.
2. Adicionar 50 mL de solvente en dos concentraciones: etanol al 50 % y agua destilada al 50 %.
3. Mantener las muestras en maceración durante 72 h en condiciones de oscuridad, sin exposición a la luz, con el fin de evitar la degradación de compuestos sensibles.
4. Preparar una solución estándar de Trolox en metanol a concentración conocida para la elaboración de la curva de calibración.

5. Preparar la solución stock de Trolox para ABTS mediante la disolución de 30 mg de Trolox en 10 mL de metanol, obteniendo un rango de concentración de 0–600 mg·L<sup>-1</sup>.
6. Preparar las diluciones correspondientes para la curva de calibración conforme a las proporciones indicadas en la Tabla 2, realizando cada dilución por triplicado.

Tabla 2. Disoluciones y concentraciones para la determinación de antioxidantes

<b>Mg/mL</b>	<b>Solución Stock Trolox (mL)</b>	<b>Metanol</b>	<b>Volumen final</b>
<b>0</b>			
<b>100</b>	33,3	966,7	
<b>200</b>	66,66	933,4	
<b>300</b>	99,99	900,0	1 mL
<b>400</b>	133,32	866,36	Cada dilución se realiza por triplicado
<b>500</b>	166,65	833,36	
<b>600</b>	199,98	800,02	

En la tabla No. 2 se muestran las disoluciones y volumen final con el que deben quedar cada una de las muestras.

7. Pesar 38.41 mg de reactivo ABTS y aforar a 5 mL con agua desionizada en un matraz, protegiendo la solución de la luz mediante papel aluminio.
8. Preparar una solución de persulfato de potasio mediante su disolución en agua desionizada y aforo a 25 mL, protegiéndola de la luz.
9. Mezclar las soluciones de ABTS y persulfato de potasio en proporciones adecuadas hasta obtener un volumen final de 10 mL.
10. Almacenar la mezcla durante 16 h a temperatura ambiente en condiciones de oscuridad, con el fin de permitir la generación del radical ABTS.
11. Diluir la solución obtenida con 400 mL de etanol y 400 mL de agua desionizada (relación 1:1) para obtener la solución de trabajo.

12. Adicionar la muestra o estándar a la solución reactiva y medir la absorbancia utilizando un espectrofotómetro UV-VIS a una longitud de onda de 734 nm.
13. Calcular la actividad antioxidante como el porcentaje de inhibición de la absorbancia, conforme a lo descrito por Rioja *et al.* (2018).

#### **6.5.1.4 Determinación de azúcares reductores (técnica DNS)**

El método del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) se emplea para la cuantificación de azúcares reductores mediante una reacción de oxidación-reducción. Bajo condiciones de calor, los azúcares reductores reaccionan con el DNS, reduciéndolo a 3-amino-5-nitrosalicílico, generando un cambio de coloración de amarillo a tonos marrones proporcional a la concentración de azúcares presentes (Burgos, 2020).

##### *Preparación del reactivo DNS y curva de calibración*

##### **Material**

- 1.6 g de NaOH
- 43.8 g de tartrato de sodio-potasio (Na-K)
- 1 g de DNS (ácido 3,5-dinitrosalicílico)
- Micropipetas de 20, 200, 500 y 1000  $\mu$ L
- Tubos cubiertos con aluminio

##### *Metodología:*

1. Pesar 0.2 g de glucosa y disolver en agua destilada dentro de un matraz aforado de 100 mL, homogeneizar la solución hasta alcanzar el volumen final.
2. Preparar el reactivo DNS adicionando 1.6 g de NaOH en 50 mL de agua destilada dentro de un vaso de precipitado cubierto con aluminio, agitar hasta su completa disolución.

3. Adicionar lentamente 43.8 g de tartrato de sodio-potasio, agitar mediante agitación magnética hasta su disolución completa y posteriormente incorporar 1 g de DNS.
4. Aforar la solución a 100 mL con agua destilada y mantener en agitación durante 24 h, protegida de la luz mediante papel aluminio, para su posterior uso en la curva de calibración.
5. Preparar las soluciones estándar de glucosa conforme a las concentraciones indicadas en la Tabla 3, adicionando los volúmenes correspondientes de glucosa, reactivo DNS y agua destilada, realizando cada preparación en condiciones homogéneas.

Tabla 3. Preparación de soluciones de glucosa para curva de calibración

Reactivo	Blanco	Concentración (g/L)					
		0,5	0,7	1,0	1,5	1,7	2,0
<b>Glucosa (mL)</b>	-	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<b>Agua (mL)</b>	0,25	-	-	-	-	-	-
<b>Reactivo DNS (mL)</b>	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<b>Agua Destilada (mL)</b>	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5

En la tabla No. 3 se muestran las disoluciones, concentraciones y el volumen final con el que debe quedar las muestras.

#### *Determinación de azúcares en las muestras*

6. Tomar 1 mL de extracto de café y centrifugar durante 5 min a 4000 rpm para eliminar partículas suspendidas.
7. Adicionar en tubos cubiertos con aluminio 250  $\mu$ L de muestra y 250  $\mu$ L de reactivo DNS utilizando micropipetas.

8. Colocar los tubos en baño maría a 92 °C durante 5 min para inducir la reacción.
9. Enfriar las muestras en congelador durante 5 min para detener la reacción.
10. Adicionar 2500 µL de agua destilada a cada tubo para diluir la muestra.
11. Medir la absorbancia en un espectrofotómetro UV-VIS a una longitud de onda de 540 nm.

## **6.6 Tostado y torrefacción de café**

El tostado y la torrefacción son procesos térmicos aplicados a materiales orgánicos, como granos o semillas. El tostado implica un incremento gradual de la temperatura que induce reacciones químicas complejas, tales como la reacción de Maillard y la caramelización, responsables del desarrollo de los compuestos aromáticos y del perfil de sabor característico del café. Por su parte, la torrefacción es un proceso más intensivo, que se lleva a cabo a temperaturas más elevadas y, en algunos casos, en atmósferas controladas, lo que provoca una degradación más profunda de la estructura química del material, favoreciendo la eliminación de humedad y modificaciones más marcadas en sus características organolépticas (ICAFE, 2022). Para obtener tostados uniformes, es fundamental partir de granos de café de alta calidad, con un contenido de humedad homogéneo cercano al 12 %, tamaño uniforme (mediante el uso de cribas), así como un color verdoso o amarillento dependiendo del tipo de beneficio y una apariencia brillante, características propias de un café fresco (FNCC, 2022).

El tostado de las muestras se llevó a cabo en las instalaciones de la Asociación Mexicana de la Cadena Productiva del Café A.C. (AMECAFÉ), en la Ciudad de México. El proceso se realizó conforme a la metodología establecida por la Specialty

*Coffee Association* (SCA, 2024), utilizando un tostador de muestras de tambor marca Probat BRZ2 eléctrico (110 V), con el objetivo de obtener un tostado medio. Durante el tostado, los granos de café correspondientes al beneficio natural presentaron el fenómeno denominado *first crack* a los 4:50 min, indicando el inicio de la expansión del grano y el desarrollo de compuestos aromáticos. Posteriormente, al minuto 5:38, los granos alcanzaron una temperatura de 185 °C, momento en el cual fueron retirados de la tostadora para obtener un tostado medio, caracterizado por un equilibrio entre acidez y dulzor, con notas sensoriales de frutos rojos, caramelo, nuez y canela.

En el caso del beneficio honey, los granos comenzaron a presentar el *first crack* a los 5:00 min. Al minuto 6:23, alcanzaron una temperatura de 180 °C, punto en el cual fueron retirados de la tostadora para obtener un tostado medio, caracterizado por un perfil sensorial equilibrado entre acidez y dulzor, con notas de frutos secos, vainilla, almendra y miel.

Finalmente, los granos correspondientes al beneficio lavado presentaron el *first crack* a los 4:58 min. Al minuto 6:00, alcanzaron una temperatura de 180 °C, momento en el cual fueron retirados de la tostadora para obtener un tostado medio, caracterizado por notas sensoriales de nuez, cacao, frutos secos y chocolate.

## **6.7 Evaluación sensorial de café**

El análisis sensorial del café se llevó a cabo en el laboratorio de catación de la Asociación Mexicana de la Cadena Productiva del Café (AMECAFÉ), ubicado en la Ciudad de México. La evaluación se realizó conforme a la metodología establecida por la *Specialty Coffee Association* (SCA, 2024), utilizando la hoja oficial de



Es un proceso sistemático y científico para analizar y caracterizar las propiedades sensoriales del café, utilizando los sentidos. Este proceso incluye la aplicación de técnicas estandarizadas para evaluar atributos como aroma, sabor, cuerpo, acidez, amargor y otros perfiles sensoriales específicos. La evaluación se realiza a través de paneles entrenados o consumidores en condiciones controladas para obtener datos objetivos sobre la calidad, perfil y aceptación del café. Se emplearon metodologías rigurosas, como la cata de café y análisis estadísticos, para garantizar la precisión, reproducibilidad y relevancia de las percepciones sensoriales obtenidas (Sánchez y Olivares, 2019).

La calidad en taza del café se evaluó después del tostado realizado al grano, mediante una cata (evaluación para conocer características sobre la calidad final). La calidad de taza, que puede ser corroborada por una evaluación sensorial bajo protocolos de evaluación y calificar los atributos encontrados en el aroma del café molido, aroma de la bebida, acidez, amargo, cuerpo y sabor del café. Las categorías 9, 8 y 7 describen las cualidades deseables en todos los atributos, siendo de 9 en adelante la mejor calificación, propia de una bebida de características equilibradas, 6, 5, 4 son tazas de cualidades tolerables y de 3 a 1 se encuentran cafés calificados con defectos (Sánchez y Olivares, 2019).

### **6.8 Modelado matemático de la cinética de secado**

La cinética de secado fue evaluada utilizando la razón de humedad (MR), calculada como:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}$$

donde  $M_t$  es el contenido de humedad en el tiempo  $t$ ,  $M_0$  es el contenido de humedad inicial y  $M_e$  es el contenido de humedad en equilibrio. Dado que  $M_e$  fue pequeño en comparación con  $M_t$  y  $M_0$ , la razón de humedad ( $MR$ ) se simplificó como:  $MR = \frac{M_t}{M_0}$

Los datos experimentales se ajustaron a tres modelos de secado: Midilli, Newton y Page modificado:

Modelo Midilli:

$$MR = a \exp(-kt^n) - bt$$

Modelo Newton:

$$MR = b + (a - b) \exp(-kt^n)$$

Modelo Page modificado:

$$MR = \exp(-(kt)^n)$$

La velocidad de secado se calculó como el cambio en la razón de humedad con respecto al tiempo:

$$\frac{d(MR)}{dt} = \frac{MR_{i+1} - MR_i}{t_{i+1} - t_i}$$

La difusividad efectiva de la humedad ( $D_{eff}$ ) se estimó a partir de la segunda ley de Fick:

$$\ln(MR) = \ln\left(\frac{8}{\pi^2}\right) - \frac{\pi^2 D_{eff}}{4L^2} t$$

El ajuste del modelo se evaluó utilizando el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el error estándar.

## **6.9. Diseño experimental**

El experimento se condujo bajo un diseño de bloques completamente al azar con tres repeticiones. Los tratamientos estuvieron definidos por la combinación de dos factores: tipo de beneficio del café (natural, lavado y honey) y uso de zeolita (con y sin zeolita). Las variables de respuesta incluyeron la cinética de secado, las propiedades químicas y físicas del café, así como la evaluación sensorial en taza.

Los datos obtenidos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA), considerando un nivel de significancia de  $p \leq 0.05$ . En los casos en que se detectaron diferencias significativas, se realizó una comparación de medias mediante la prueba LSD ( $p \leq 0.05$ ). Adicionalmente, durante el proceso de secado se registraron variables ambientales, incluyendo temperatura, humedad relativa y tiempo, con el fin de monitorear las condiciones experimentales.



## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados que se presentan en los Cuadros 1 y 2 corresponden a los análisis realizados a los tratamientos, por tipo de beneficio y tipo de mineral, así como la interacción entre los mismos, y tiene que ver con las variables respuesta como el porcentaje de humedad, fenoles totales mg EAG/ml<sup>-1</sup>, saponinas mg g<sup>-1</sup>, fenoles mg g<sup>-1</sup>, actividad de agua ( $a_w$ ), densidad kg/m<sup>3</sup>, azúcares reductores g/L y antioxidantes  $\mu\text{mol Trolox/g}$ . a los que se les aplicó un ANOVA ( $p \leq 0,05$ ) y cuando existieron diferencias significativas una prueba de comparación de medias de LSD ( $p \leq 0,05$ ). A continuación, se realiza la discusión de los resultados de las variables indicadas.

### 7.1 Humedad

La humedad es un factor crítico en la calidad final del café ya que influye en las reacciones físicas, químicas y microbiológicas que ocurren durante el proceso de beneficio. Por tanto, no solo afecta la seguridad del producto, sino también su perfil sensorial y valor comercial.

#### 7.1.1 Beneficio

En esta investigación, los resultados mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) en el contenido de humedad entre los distintos métodos de beneficio el rango de valores obtenido para esta variable va de ( $10,44 \pm 0,01$  a  $10,53 \pm 0,08$  %), tal como se observa en el Cuadro 1, el mayor contenido de humedad se registró en el beneficio natural ( $10,73 \pm 0,11$  %), seguido del beneficio *honey* ( $10,62 \pm 0,11$  %), mientras que el valor más bajo se obtuvo en el beneficio lavado ( $10,53 \pm 0,08$  %).

Sin embargo, estas diferencias se consideran dentro del rango aceptable, dado que el método de determinación de humedad se encuentra dentro del intervalo establecido por la norma NMX-F-195-SCFI-2016 para café verde. Por lo tanto, aunque los análisis estadísticos detecten diferencias, estas podrían estar dentro del margen de error del método, lo que sugiere que, desde el punto de vista práctico, los contenidos de humedad entre los métodos de beneficio son comparables.

Osorio *et al.* (2024), reportaron un contenido de humedad de 10,90 % en café verde obtenido mediante beneficio húmedo, resaltando la importancia de monitorear y controlar cuidadosamente el proceso de secado. Dicho valor se encuentra dentro del rango óptimo de (10 a 12 %), ampliamente reconocido como adecuado para garantizar la estabilidad del producto durante el almacenamiento, Sandeep *et al.* (2021), sugiere que mantener la humedad dentro de este intervalo es crucial, ya que niveles superiores favorecen la proliferación de microorganismos, mientras que niveles excesivamente bajos pueden comprometer la calidad física y sensorial del grano.

La humedad del grano actúa directamente sobre su vida útil al influir en la actividad del agua ( $a_w$ ), la cual fuera de un rango de (0,30 a 0,60), determina la velocidad de crecimiento microbiano y de reacciones bioquímicas no deseadas., el rango de valores es de ( $0,47 \pm 0,002$  a  $0,55 \pm 0,002$ ) mismo que se observa en el cuadro 1 de la presente investigación. Contenidos de humedad superiores al (12 %) favorecen el desarrollo de hongos como *Aspergillus* spp., con el consecuente riesgo

de producción de micotoxinas, además de acelerar procesos de oxidación lipídica que afectan la estabilidad del grano. Por otro lado, una humedad excesivamente baja (< 10 %) puede generar pérdida de masa y fracturas estructurales, comprometiendo la integridad física del producto afectando peso, transporte y riesgo de hongos (Moon *et al.*, 2022).

Cuadro 1. Resultados de los análisis (Humedad, fenoles totales, saponinas, fenoles, actividad de agua, densidad, azúcares reductores y antioxidantes) realizados a los tratamientos.

TRATAMIENTOS	Humedad %	Actividad de agua $a_w$	Densidad $\text{kg/m}^3$	Fenoles Totales $\text{mg EAG/ml}^{-1}$	Fenoles $\text{mg g}^{-1}$	Saponinas $\text{mg g}^{-1}$	Azúcares Reductores $\text{g/L}$	Antioxidantes $\mu\text{mol Trolox/g}$
	$\bar{X} \pm \text{DS}$	$\bar{X} \pm \text{DS}$	$\bar{X} \pm \text{DS}$	$\bar{X} \pm \text{DS}$	$\bar{X} \pm \text{DS}$	$\bar{X} \pm \text{DS}$	$\bar{X} \pm \text{DS}$	$\bar{X} \pm \text{DS}$
<i>HONEY</i>	10,62±0,11b	0,50±0,010b	768,83±5,19a	52,03±1,40c	34,33±9,93b	222,55±1,58b	8,38±0,38b	9058,17±67,82b
LAVADO	10,53±0,10c	0,48±0,010c	704,33±2,58c	51,83±1,62c	21,18±0,21d	191,12±2,43d	7,57±0,21c	8494,17±65,99d
NATURAL	10,73±0,11a	0,54±0,010a	771,00±7,92a	55,24±6,57b	36,48±6,78b	233,65±5,07a	9,38±0,28a	9405,00±21,21a
NO ZEOLITA	10,73±0,09a	0,51±0,030b	752,44±34,92b	55,36±4,44b	31,60±9,71c	218,32±19,95c	8,44±0,88b	9030,56±385,30b
ZEOLITA	10,53±0,08c	0,50±0,020b	743,67±30,82b	50,70±1,86c	29,73±9,86c	213,22±18,41c	8,44±0,80b	8441,00±412,21c
<i>HONEY, NO ZEOLITA</i>	10,73±0,01a	0,51±0,003b	773,33±1,53a	53,09±1,16c	43,40±0,36a	223,60±1,15b	8,60±0,36b	9120,00±5,00b
<i>HONEY, ZEOLITA</i>	10,52±0,01c	0,50±0,001b	764,33±2,08b	50,96±0,31c	25,27±0,25c	221,50±1,28b	8,17±0,30c	8996,33±2,31b
LAVADO, NO ZEOLITA	10,63±0,01b	0,49±0,002c	706,00±2,00c	52,08±1,7c	21,10±0,26d	193,13±1,11d	7,40±0,10c	8548,33±38,19d
LAVADO, ZEOLITA	10,44±0,01d	0,47±0,002c	702,67±2,08c	51,58±2,04c	21,25±0,14d	189,10±1,13d	7,73±0,11c	8440,00±25,00d
NATURAL, NO ZEOLITA	10,83±0,01a	0,55±0,002a	778,00±1,00a	60,91±2,29a	30,30±0,36c	238,23±0,86a	9,33±0,32a	9423,33±10,41a
NATURAL, ZEOLITA	10,64±0,01b	0,52±0,002a	764,00±3,00b	49,58±2,53d	42,67±0,25a	229,07±0,74a	9,43±0,30a	9386,67±2,89a

Los valores son el promedio ( $\bar{X}$ ) y desviación estándar (DS) de triplicados. Los valores de cada columna con diferentes letras (a, b, c y d) indican las diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), entre los tratamientos

Cuadro 2. Resultados de color (L\*, a\*, b\*, c\* y h y pH) realizados a los tratamientos.

TRATAMIENTOS	pH	a*	b*	c*	H	L*
	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$
<i>HONEY</i>	6,26±0,027a	2,067±0,390d	22.75±0.393d	24,82±0,726d	0,092±0,017c	70,15±1,00a
<b>LAVADO</b>	6,22±0,038c	2,227±0,194d	23.16±0.248b	25,38±0,337c	0,093±0,008c	67,92±2,37b
<b>NATURAL</b>	6,21±0,061c	3,263±0,269a	23.83±0.378a	27,10±0,621a	0,137±0,008a	67,36±2,05c
<b>NO ZEOLITA</b>	6,24±0,038b	2,422±0,813c	23.27±0.747b	25,69±1,519b	0,102±0,031b	69,92±1,28a
<b>ZEOLITA</b>	6,21±0,056c	2,615±0,339b	23.23±0.339b	25,84±0,660b	0,112±0,014b	67,03±1,92c
<i>HONEY, NO ZEOLITA</i>	6,24±0,020b	1,713±0,072e	22.51±0.422d	24,22±0,471d	0,077±0,006d	71,01±0,26a
<i>HONEY, ZEOLITA</i>	6,28±0,006a	2,420±0,017c	22.99±0.165c	25,42±0,150c	0,107±0,006b	69,29±0,48b
<b>LAVADO, NO ZEOLITA</b>	6,23±0,056b	2,090±0,190d	23.27±0.334b	25,36±0,523c	0,087±0,006d	69,76±1,17a
<b>LAVADO, ZEOLITA</b>	6,20±0,011c	2,363±0,038c	23.05±0.064b	25,41±0,095c	0,100±0,001b	66,09±1,59d
<b>NATURAL, NO ZEOLITA</b>	6,26±0,042a	3,463±0,241a	24.03±0.447a	27,49±0,668a	0,143±0,006a	68,99±1,43b
<b>NATURAL, ZEOLITA</b>	6,16±0,006d	3,063±0,042a	23.64±0.209a	26,70±0,220a	0,130±0,001a	65,73±0,69d

Los valores son el promedio ( $\bar{X}$ ) y desviación estándar (DS) de triplicados. Los valores de cada columna con diferentes letras (a, b, c, d y e) indican las diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), entre los tratamientos.

En cuanto a la calidad sensorial, la humedad desempeña un papel clave en la conservación de compuestos volátiles responsables del olor, sabor y aroma característicos del café. Niveles fuera del rango óptimo del (10 a 12 %) pueden alterar el equilibrio de las reacciones no enzimáticas, especialmente el pardeamiento no enzimático o reacción de Maillard por otro lado demasiada humedad (> 12 %), hay más riesgo de vapor excesivo, lo que puede causar un tueste irregular, diluir reacciones químicas, o prolongar demasiado el tueste (riesgo de sabores planos o ahumados). Además, niveles de humedad inadecuados pueden aumentar la actividad del agua, facilitando la proliferación microbiana y procesos de oxidación lipídica que contribuyen a la rancidez y pérdida de calidad aromática. En conjunto, estas alteraciones químicas resultan en modificaciones del color y sabor percibidos en taza, disminuyendo la aceptación del café en mercados especializados (Abreu *et al.*, 2025).

### **7.1.2 Tipo de mineral**

En este sentido, la implementación de técnicas de secado más eficientes, como el uso de materiales adsorbentes tipo zeolita, representa una estrategia prometedora para controlar la humedad del (10 a 12 %) durante el almacenamiento postcosecha.

Se observaron diferencias significativas en función del tipo de material utilizado durante el secado. El rango de valores encontrado para el tipo de material es ( $10,73 \pm 0,09$  a  $10,53 \pm 0,08$  %) mismos que se muestran en el Cuadro 1, los tratamientos sin zeolita presentaron el mayor contenido de humedad mientras que los tratamientos con zeolita registraron valores ligeramente inferiores. La incorporación

de zeolita, debido a su alta capacidad de adsorción de humedad relativa en la zona de estudio es de (60 %), no solo mejora la eficiencia del secado, sino que también favorece la estabilidad microbiológica y la conservación de los atributos sensoriales del grano (Debona *et al.*, 2022). Su aplicación en procesos de beneficio húmedo ha demostrado reducir significativamente los tiempos de secado hasta 24 h en café lavado, 10 h en el método *honey* y para el beneficio seco 12 h en el proceso natural, en comparación con los métodos convencionales (Osorio *et al.*, 2022).

Pérez y colaboradores (2022), indican en su investigación que la zeolita presenta una alta capacidad de adsorción de agua gracias a su estructura cristalina, compuesta por canales y cavidades a escala nanométrica, que le permiten captar y retener eficientemente moléculas de agua del entorno. Cabe destacar que, al integrarse en el proceso de secado, la zeolita actúa como un adsorbente selectivo de vapor de agua, facilitando su captura desde el aire circundante a los granos. Esta acción reduce la humedad relativa del microambiente, incrementando el gradiente de presión de vapor entre el grano y el entorno, lo que acelera y estabiliza el proceso de deshidratación preservando su calidad.

### **7.1.3 Interacción**

En relación con la interacción los resultados indican que el uso de zeolita en el beneficio lavado es el que obtuvo menor concentración lo que corrobora las explicaciones antes mencionadas. El rango de valores obtenido para esta variable esta entre ( $10,83 \pm 0,01$  a  $10,44 \pm 0,01$  %) como se muestra en el Cuadro 1, el mayor contenido de humedad se registró en el beneficio natural sin adición de zeolita,

seguido del método *honey* sin zeolita, mientras que el valor más bajo se observó en el beneficio lavado con zeolita.

Los resultados indican que el uso de zeolita en el proceso de secado tiene un efecto significativo en la reducción del contenido de humedad del grano, especialmente en el beneficio lavado. Además, el tipo de beneficio influye en la retención de humedad, siendo el método natural el que presenta mayores niveles, lo que sugiere que la combinación adecuada de tratamiento y beneficio es clave para optimizar la deshidratación y la calidad del café.

Las muestras evaluadas corresponden a *Coffea arabica* L. variedad Caturra de la zona de Temascaltepec beneficiadas en Toluca que corresponden al rango de humedad entre  $0,53 \pm 0,015$  a  $10,83 \pm 0,015$  %, se encuentran dentro del intervalo establecido por la norma NMX-F-195-SCFI-2016 para café verde (10 a 12 %). De manera similar, López *et al.* (2016) reportan porcentajes de humedad dentro del rango óptimo para la misma variedad, sin especificar el tipo de beneficio, señalando que granos almacenados dentro de este rango pueden conservar su calidad sin deterioro significativo.

A pesar de que existieron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), y de que se formaron 3 grupos estadísticamente significativos ( $p \leq 0,05$ ), (a, b, c), estas diferencias fueron mínimas en un (0, 39 %) en un rango de valores de  $10,44 \pm 0,01$  a  $10,83 \pm 0,01$  % por lo que todos los tratamientos se encuentran en el valor óptimo de humedad sin dejar de mencionar que el mejor fue el beneficio de lavado ya mencionado.

#### **7.1.2.1 Actividad de agua ( $a_w$ )**

La actividad de agua ( $a_w$ ) es un parámetro fundamental que indica la cantidad de agua libre disponible en un alimento para participar en reacciones químicas o permitir el crecimiento microbiano. Se expresa como un valor decimal entre 0 y 1, y representa un indicador crítico durante las etapas de almacenamiento y postcosecha del café, ya que influye directamente en su estabilidad microbiológica y calidad sensorial (Food Safety Institute, 2023).

### **7.1.2.2 Beneficio**

En la presente investigación, los resultados obtenidos para actividad de agua ( $a_w$ ) mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. En rango de valores obtenidos para esta variable se encuentra entre  $0,48 \pm 0,010$  a  $0,54 \pm 0,010$  siendo el primero para *honey* y último para lavado. Tal como se muestra en el Cuadro 1, el mayor valor de actividad de agua se registró en el beneficio natural ( $0,54 \pm 0,010$ ), seguido del beneficio *honey* ( $0,50 \pm 0,010$ ), mientras que el menor valor se observó en el beneficio lavado ( $0,48 \pm 0,010$ ) en el caso del beneficio natural estas variaciones pueden explicarse por la humedad residual proveniente de la pulpa y mucílago, que permanecen durante más tiempo, y que hace que el secado sea más lento en los granos, sin afectar el valor final (Moon *et al.*, 2024).

Por otro lado, un  $A_w$  demasiado bajo ( $< 0,30$ ) puede afectar negativamente la calidad sensorial del café, ya que la desecación excesiva puede provocar pérdida de compuestos aromáticos y alterar la textura del grano (Souza *et al.*, 2017). Por ello, mantener un equilibrio adecuado de ( $a_w$ ) entre los resultados ( $0,54 \pm 0,010$  a  $0,48 \pm 0,010$ ) es esencial para preservar la estabilidad microbiológica y las

propiedades sensoriales del café durante su almacenamiento y comercialización (Souza *et al.*, 2019), rango en el cual se encuentran los resultados del benéfico de la presente investigación.

### **7.1.2.3 Mineral**

No se identificaron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ) en función del uso de zeolita como material adsorbente, a pesar de ello los tratamientos que incluyeron zeolita presentaron valores de ( $a_w$ ) inferiores que con aquellos sin este material. Tal como se presenta en el Cuadro 1, los tratamientos sin zeolita mostraron un mayor valor de actividad de agua ( $a_w$ ) ( $0,51 \pm 0,030$ ), mientras que los tratamientos con zeolita registraron valores ligeramente inferiores ( $0,50 \pm 0,020$ ). Este comportamiento confirma el efecto de la zeolita como agente adsorbente que mejora la eficiencia del proceso de secado, disminuyendo la retención de humedad en los granos igual que en el caso de los beneficios estos valores se encuentran en el rango seguro.

Esta reducción podría atribuirse a la capacidad de adsorción de humedad de la zeolita, que disminuye la humedad relativa del ambiente de secado y acelera el proceso de deshidratación del grano. Debido a que los granos tratados con zeolita retuvieron menos humedad al finalizar el secado, también tiene menos valores de actividad de agua.

La actividad de agua ( $a_w$ ) está relacionada con el contenido de agua libre, que es la fracción disponible para participar en reacciones químicas o para el crecimiento microbiano, y el agua ligada, que está firmemente asociada a los componentes del

grano y no está disponible para dichos procesos (Fontana *et al.*, 2013). La capacidad de la zeolita para adsorber humedad ayuda principalmente a reducir el agua libre, incrementando la estabilidad microbiológica y química del café durante el almacenamiento (Bastida *et al.*, 2009), seguramente no se vio efecto en el experimento en el invernadero por su dimensión y además que no se pueden controlar todas las condiciones, ya que se intentó simular a las del productor, el uso de zeolita ya ha sido probada y habría que buscar la forma de hacer la transferencia de conocimiento a el productor.

Según lo reportado por kaur (2022), la actividad de agua ( $a_w$ ) en el café generalmente oscila entre (0,30 y 0,60) para asegurar su estabilidad microbiológica y preservar su calidad durante el almacenamiento, los resultados en el cuadro 1 indican que se encuentran dentro del rango reportado por literatura ( $10,53 \pm 0,015$  a  $10,83 \pm 0,015$  %), ya que niveles superiores propician el desarrollo de microorganismos como *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Alternaria* y *Cladosporium*. La presencia de estos hongos afecta negativamente la inocuidad del producto y su calidad sensorial, comprometiendo tanto la vida útil como la aceptación del café en mercados exigentes (Souza *et al.*, 2019; Moon *et al.*, 2024).

Durante el secado en invernadero de la presente investigación, las condiciones térmicas controladas contribuyeron a la reducción de la actividad de agua en todos los tratamientos. Aunque la radiación solar no incide de manera directa sobre los granos, el ambiente cálido y cerrado del invernadero eleva la temperatura

superficial, favoreciendo la evaporación del agua libre y acelerando el proceso de deshidratación. Esta pérdida de humedad disponible se traduce en una disminución de la actividad de agua ( $a_w$ ), limitando así las condiciones necesarias para el desarrollo de microorganismos.

En relación con las condiciones específicas del secado en invernadero empleadas en este estudio, la eficiencia del proceso estuvo determinada por factores como la temperatura controlada dentro del invernadero (30 a 45 °C), la ventilación adecuada que garantizó una correcta circulación del aire, la humedad relativa del ambiente interior (50 a 65 %) y la uniformidad en la exposición de los granos al flujo de aire caliente. Aunque la radiación favorece la deshidratación, un secado excesivamente rápido (< 10 días) puede comprometer la calidad del grano, generando fisuras o volatilizándolo compuestos bioactivos sensibles al calor (ácidos clorogénicos, cafeína, trigonelina, ácidos orgánicos (cítrico, málico, acético, láctico), azúcares reductores (glucosa, fructosa, sacarosa), (Erskine *et al.*, 2022). Las fisuras aumentan la vulnerabilidad del grano a la entrada de humedad y microorganismos, facilitando el crecimiento de mohos y bacterias que pueden provocar deterioro y pérdidas económicas (Silva *et al.*, 2018a). Además, estas grietas pueden afectar negativamente la uniformidad durante el proceso de tostado, lo que resulta en una extracción desigual y sabores indeseados en la taza final (Oliveira *et al.*, 2017).

#### **7.1.2.4 Interacción**

En la interacción entre tipo de beneficio y tratamiento se identificaron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ). Como se ve en el Cuadro 1, el mayor valor de actividad de agua ( $a_w$ ) se registró en el tratamiento de beneficio natural sin zeolita

( $0,55 \pm 0,002$ ), seguido del beneficio *honey* con zeolita ( $0,52 \pm 0,001$ ). En contraste, la menor actividad de agua se observó en el beneficio lavado con zeolita ( $0,47 \pm 0,002$ ), lo que sugiere el efecto combinado del tipo de beneficio y del uso de zeolita sobre el contenido de agua libre en los granos de café. En esta interacción nuevamente se observa que a pesar de haber diferencias estadísticas significativas todos los tratamientos se encuentran dentro de los valores seguros reportados en literatura, tan es el caso de, Osorio *et al.* (2024) quienes reportaron un valor de actividad de agua de (0,61) en café verde en beneficio lavado sin la presencia de otro material secante, los autores sugieren tal como se vio en la presente investigación que alcanzar niveles seguros de actividad de agua ( $a_w$ ) es posible mediante un secado controlado en el cual las condiciones de temperatura, humedad y circulación de aire se controlan cuidadosamente para asegurar que la deshidratación del producto sea uniforme y gradual.

#### **7.1.3.1 Densidad**

La densidad, definida como la relación entre la masa y el volumen del grano de café, es un parámetro clave para evaluar su calidad. En el grano de café se sugiere que en condiciones de secado se entren en un rango de ( $650$  a  $750 \text{ kg/m}^3$ ) (Kumar *et al.*, 2018), granos con densidad alta suelen estar mejor desarrollados, presentando un mayor contenido de compuestos solubles (azúcares, péptidos, ácidos, alcaloides) que contribuyen a atributos sensoriales superiores, como sabores más complejos y aromas más intensos (Mendes *et al.*, 2020). Esto se debe a que la estructura celular compacta de estos granos favorece la retención de metabolitos responsables del sabor y aroma (Mussatto, Machado, Martins, & Teixeira, 2011; Camargo, Andrade,

& Pereira, 2018). Además, la densidad influye en el comportamiento térmico durante el tueste, ya que los granos más densos requieren ajustes en tiempo y temperatura para lograr un perfil sensorial óptimo (Farah & Donangelo, 2006).

La altitud es un factor determinante, ya que a mayores alturas las condiciones ambientales como temperaturas más bajas y mayor radiación UV promueven un desarrollo más lento y una densidad superior, incrementando compuestos fenólicos y ácidos clorogénicos que mejoran la calidad sensorial, en general el café se desarrolla a una altitud de (800 a 2 200 m s. n. m.), (Silva, Ferreira, & Moreira, 2018; Avelino *et al.*, 2005 b).

El estado de madurez también es crucial; granos cosechados en su punto óptimo (18 a 24 °Brix), presentan mayor densidad y concentración de compuestos bioactivos, mientras que una madurez excesiva arriba de (> 24 °Brix) puede provocar degradación y pérdida de firmeza (Liu, Liu, & Wang, 2016).

Finalmente, el contenido de humedad debe mantenerse en rangos adecuados 10 a 12 % para preservar la integridad celular, dado que niveles elevados arriba de (> 12 %) pueden reducir la densidad aparente y aumentar el riesgo de deterioro microbiano (Souza, Pereira, & Almeida, 2019).

#### **7.1.3.2 Beneficio**

En la presente investigación, los valores de densidad aparente mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio en granos de café en verde. Tal como se observa en el Cuadro 1, el mayor valor de densidad aparente se registró en el tratamiento de beneficio natural (771,00

$\pm 7,92 \text{ kg/m}^3$ ), seguido del beneficio *honey* ( $768,83 \pm 5,19 \text{ kg/m}^3$ ), mientras que la menor densidad se observó en el beneficio lavado ( $704,33 \pm 2,58 \text{ kg/m}^3$ ), resultados que están por encima de los valores reportados en literatura ( $> 7000 \text{ kg/m}^3$ ), (Kumar *et al.*, 2018). Algunas de estas diferencias pueden explicarse, por las características estructurales y morfológicas específicas de cada tipo de beneficio. En los tratamientos natural y *honey*, al conservarse una mayor cantidad de mucílago y capas externas durante el secado, se limita la contracción del grano, lo que favorece una estructura más compacta y densa. Adicionalmente, factores agroecológicos como la altitud influyen significativamente en la densidad del grano. A mayores altitudes por encima de 1 200 m s. n. m., las temperaturas suelen ser más bajas, generalmente entre 15 a 20 °C, en contraste con zonas bajas donde pueden superar los 25 °C. Estas condiciones más frescas ralentizan la maduración del fruto, permitiendo un desarrollo más prolongado de compuestos bioactivos y una mejor acumulación de azúcares y nutrientes, lo que resulta en granos más densos y de mayor calidad sensorial (Avelino *et al.*, 2005 a; Silva, Ferreira, & Moreira, 2018b). La maduración lenta reduce el estrés metabólico en la planta, favoreciendo la síntesis de metabolitos secundarios como fenoles y ácidos clorogénicos, que aportan al perfil aromático y al cuerpo del café (Schultz, 2008).

La densidad del grano verde es un indicador clave en la industria cafetera, ya que afecta directamente el perfil sensorial del producto final. Granos más densos presentan una menor porosidad y mayor integridad estructural debido a un desarrollo celular más compacto y a una menor porosidad interna, que resulta de un crecimiento prolongado y óptimas condiciones agroclimáticas, como

temperaturas frescas y una maduración lenta, lo que permite una transferencia térmica más uniforme debido a que el calor se distribuye de manera más homogénea a través del grano, evitando puntos calientes o zonas subtostadas (Baggenstoss *et al.*, 2008). Como resultado, la reacción de Maillard y otras transformaciones químicas ocurren de forma uniforme, lo que mejora el desarrollo del aroma, sabor y cuerpo del café durante el tueste y una mejor extracción de compuestos solubles en la preparación de la bebida, contribuyendo así a una taza de mayor calidad (Avelino *et al.*, 2005 a).

### **7.1.3.3 Mineral**

Respecto al tipo de mineral utilizado, se identificaron diferencias estadísticamente significativas. Como se muestra en el Cuadro 1, los tratamientos sin zeolita presentaron un mayor valor promedio de densidad aparente ( $752,44 \pm 34,92 \text{ kg/m}^3$ ), en comparación con los tratamientos que incorporaron zeolita ( $743,67 \pm 30,82 \text{ kg/m}^3$ ). La zeolita durante el proceso de secado actúa como un agente adsorbente que regula la pérdida de humedad, promoviendo una deshidratación más gradual y homogénea del grano (Alonso *et al.*, 2016). Esta regulación en la tasa de secado reduce la contracción brusca y el estrés mecánico en la estructura celular, lo cual contribuye a preservar la integridad y densidad del grano (Kumar *et al.*, 2018). Como resultado, el grano mantiene una estructura más compacta y consistente, favoreciendo sus propiedades físicas y químicas esenciales para la calidad final del café.

#### 7.1.3.4 Interacción

En la interacción entre tipo de beneficio y tratamiento, se observaron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ). El rango de valores obtenido para esta variable es de  $702,67 \pm 2,08$  a  $778,00 \pm 1,00 \text{ kg/m}^3$ , como se muestra en el Cuadro 1, el valor más alto de densidad aparente se obtuvo en el beneficio natural sin zeolita ( $778,00 \pm 1,00 \text{ kg/m}^3$ ), seguido del beneficio *honey* sin zeolita ( $773,33 \pm 1,53 \text{ kg/m}^3$ ). Por el contrario, el valor más bajo se registró en el beneficio lavado con zeolita ( $702,67 \pm 2,08 \text{ kg/m}^3$ ), lo que sugiere que tanto el tipo de beneficio como el uso de zeolita afectan de forma Interactiva este parámetro físico.

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Osorio *et al.* (2024), para zonas altas, quienes documentaron valores de densidad aparente entre ( $702,90 \pm 14,34 \text{ g/L}$  y  $707,31 \pm 14,34 \text{ g/L}$ ) en café almendra seco, asociando estos valores a la calidad física del grano. Los granos más densos tienden a ser más duros y con mayor contenido de azúcares y compuestos aromáticos, elementos que aportan complejidad y equilibrio al perfil sensorial de la bebida final. Esta mayor densidad se asocia con una estructura celular más compacta que favorece la retención de compuestos solubles y una mejor transferencia térmica durante el tueste, lo cual contribuye a un desarrollo uniforme de los sabores y aromas (Avelino *et al.*, 2005 b; Melo *et al.*, 2017).

##### 7.1.4.1 Fenoles (Folin-Ciocalteu)

En este estudio se emplearon dos métodos complementarios para la extracción y cuantificación de compuestos fenólicos: el ensayo de Folin-Ciocalteu y la extracción por separación de solventes. El método de Folin-Ciocalteu es ampliamente utilizado

para determinar el contenido total de fenoles debido a su alta sensibilidad y simplicidad, basándose en la capacidad reductora de los compuestos fenólicos para reaccionar con el reactivo de Folin, generando un complejo azul cuya absorbancia es proporcional a la concentración de fenoles totales. Sin embargo, este método mide el contenido total y no permite diferenciar entre tipos específicos de fenoles ni separarlos según su solubilidad. Los fenoles son compuestos bioactivos de origen vegetal (García y fuentes, 2012).

En el café se encuentran principalmente en forma de ácidos fenólicos, como el ácido clorogénico, cafeico y ferúlico, y desempeñan un papel fundamental en sus propiedades antioxidantes, así como en el sabor, aroma y estabilidad, contribuyen al amargor y la astringencia de la bebida, y su concentración varía según la variedad del grano, el método de procesamiento y las condiciones ambientales (Erskine *et al.*, 2022).

#### **7.1.4.2 Beneficio**

En la presente investigación, los resultados presentaron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) en el contenido de fenoles totales ( $\text{mg EAG/ml}^{-1}$ ) entre los métodos de beneficio. El rango de valores obtenidos para esta variable es de  $55,24 \pm 6,57$  a  $51,83 \pm 1,62$   $\text{mg EAG/ml}^{-1}$ , como se observa en el Cuadro 1, el mayor contenido se registró en el beneficio natural ( $55,24 \pm 6,57$   $\text{mg EAG/ml}^{-1}$ ), seguido por el método *honey* ( $52,03 \pm 1,40$   $\text{mg EAG/ml}^{-1}$ ), y el menor en el beneficio lavado ( $51,83 \pm 1,62$   $\text{mg EAG/ml}^{-1}$ ). Estas diferencias pueden atribuirse a las particularidades de cada tipo de beneficio. En el proceso natural, el secado con mucilago y pulpa se prolonga la exposición del grano a la radiación solar porque

permanece más días en este proceso, lo que favorece una mayor acumulación de compuestos volátiles (guaiacol, etilguaiacol, 4-vinilguaiacol, ácido cafeico y ferúlico) y azúcares, responsables de sabores y aromas deseables en el café. No obstante, también existe el riesgo de la formación de compuestos no favorables, como 4-etilfenol y fenol simple. En el método *honey* se retira la pulpa, pero se conserva el mucílago, y se promueve una fermentación controlada que modula el contenido de azúcares y antioxidantes. En contraste, el beneficio lavado elimina completamente el mucílago, lo que favorece un perfil sensorial más limpio, con menor contenido de azúcares fermentables y compuestos fenólicos solubles, además de facilitar el desarrollo de aromas más delicados (Bastian *et al.*, 2021).

En la zona de estudio, alrededor de los cafetales, se observa la presencia de árboles frutales como aguacate (*Persea americana*), durazno (*Prunus persica*), granada (*Punica granatum*) y guayaba (*Psidium guajava*). Todas estas especies son árboles frondosos mayor de 3 m de altura, que requieren alta irradiación luminosa. Sin embargo, su follaje denso genera sombra, la cual protege directamente a los árboles de café (aproximadamente de 1,5 m de altura).

La coexistencia de estas especies vegetales en la finca contribuye a la formación de un microclima local, el cual puede influir en las condiciones ambientales del cultivo de café, modulando factores como la temperatura, la humedad y la radiación solar, lo que podría resultar en un ambiente más favorable para el desarrollo del cultivo, esto concuerda con Ricci *et al.* (2006) quienes observaron que el cultivo bajo sombra favorece un mayor tamaño del fruto, lo cual se asocia a una mejor

aparición física y una mayor asignación de fotosintatos. Esta condición se explica porque la sombra reduce la carga reproductiva total y el estrés térmico, lo que permite una redistribución más eficiente de recursos hacia cada fruto. Además, la maduración más lenta bajo sombra prolonga el periodo de llenado del grano, favoreciendo una mayor acumulación de biomasa y compuestos solubles, como azúcares y ácidos fenólicos. Esto puede incidir positivamente en la composición química del grano, incluyendo un mayor contenido de compuestos bioactivos y una mejora en su perfil sensorial (Vaast *et al.*, 2006; Worku *et al.*, 2018a; Huang *et al.*, 2025).

#### **7.1.4.3 Mineral**

Con respecto al uso de zeolita, también se encontraron diferencias significativas. Como se muestra en el Cuadro 1, los tratamientos sin zeolita presentaron un mayor contenido de fenoles ( $55,36 \pm 4,44$  mg EAG/ml<sup>-1</sup>), mientras que los tratamientos con zeolita registraron una menor concentración ( $50,70 \pm 1,86$  mg EAG/ml<sup>-1</sup>). Este comportamiento puede estar relacionado con el efecto del microambiente generado durante el secado, ya que la zeolita reduce la humedad del entorno ya que facilita la reducción de humedad relativa del entorno lo cual sugiere que acorte el tiempo de contacto del agua con compuestos solubles como fenoles, disminuyendo su pérdida por lixiviación. No obstante, el periodo de permanencia del calor (> 45°) en la zona de estudio en invernadero por periodos largos más de 5 h asociado a este ambiente seco que puede comprometer algunos de estos compuestos sensibles. Los resultados obtenidos indican que la incorporación de zeolita en los tratamientos redujo significativamente el tiempo de secado en los distintos métodos de beneficio

del café. En el beneficio natural, el tiempo de secado convencional fue de 20 días, mientras que con el uso de zeolita se redujo a 12 h. En el beneficio lavado, el tiempo de secado habitual es de 7 días, reduciéndose a 24 h con el tratamiento con zeolita. Por último, en el beneficio tipo *honey*, el tiempo de secado convencional de 10 días se redujo a 10 h. Estos resultados confirman el efecto positivo de la zeolita en la eficiencia del proceso de secado. No obstante, también se observó una disminución en el contenido de compuestos fenólicos en los tratamientos con zeolita, lo que podría deberse a temperaturas altas o un tiempo prolongado afectando directamente en la concentración de compuestos fenólicos que en esta investigación se encuentran en un rango de  $52,08 \pm 1,47$  y  $60,91 \pm 2,29$  mg EAG/ml<sup>1</sup> para los tratamientos sin zeolita y para los tratamientos con zeolita  $49,58 \pm 2,53$  y  $51,58 \pm 2,04$  mg EAG/ml<sup>1</sup>.

A diferencia del secado directo al sol, el secado dentro de un invernadero genera condiciones de temperatura y humedad relativa que pueden medirse y analizarse y que no varían considerablemente en las h de calor. Aunque la radiación solar penetra a través de las cubiertas transparentes, la temperatura en el aire circundante suele mantenerse entre 45 a 52 °C, lo cual acelera la deshidratación sin exponer al grano a fluctuaciones térmicas extremas ni a contaminantes externos como polvo o insectos (Leal *et al.*, 2019). No obstante, estas temperaturas moderadas pueden inducir una degradación parcial de compuestos fenólicos sensibles, como el ácido clorogénico y otros derivados. Kama *et al.* (2023); Kusumawardani *et al.* (2020) indicaron en estudios comparativos que métodos de

secado más intensos, como el aire caliente o al sol directo, pueden reducir significativamente el contenido total de fenoles por hasta un 65 a 71 %, mientras que técnicas suaves como secado al vacío o por microondas en condiciones controladas retienen mayor proporción de estos compuestos. El secado en invernadero, por su parte, representa una alternativa intermedia: acelera el secado y protege de contaminantes exteriores, pero aún podría comprometer ciertos compuestos si la temperatura y tiempo no se optimizan cuidadosamente.

#### **7.1.4.4 Interacción**

Asimismo, se identificaron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) en la interacción entre el tipo de beneficio y el tratamiento el rango obtenido de valores para los tratamientos de  $49,58 \pm 2,53$  a  $60,91 \pm 2,29$  mg EAG/ml<sup>-1</sup>, tal como se presenta en el Cuadro 1, el mayor contenido de fenoles totales se registró en el beneficio natural sin zeolita ( $60,91 \pm 2,29$  mg EAG/ml<sup>-1</sup>), seguido del método *honey* sin zeolita ( $53,09 \pm 1,16$  mg EAG/ml<sup>-1</sup>), mientras que la menor concentración se observó en el beneficio natural con zeolita ( $49,58 \pm 2,53$  mg EAG/ml). Estos resultados son mayores que los reportados por Urrunaga *et al.*, (2024), quienes reportan un contenido de  $21,79 \pm 0,75$  mg EAG/ml para café *Coffe arábica* procesada mediante beneficio lavado, y de  $20,09 \pm 0,70$  mg EAG/ml para café natural. Estas diferencias podrían explicarse por varios factores agroclimáticos propios de cada zona de cultivo. En la comunidad de Umapata (Cusco, Perú), se ha reportado una radiación solar promedio superior a ( $5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ), mientras que en Temascaltepec (Estado de México) los valores promedio se sitúan alrededor de ( $4.5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ). Asimismo, Umapata presenta una humedad relativa más

elevada (70 a 80 %) y temperaturas medias anuales ligeramente inferiores (15 a 20 °C) en comparación con Temascaltepec (55 a 60 % de humedad relativa y temperatura de 18 a 22 °C respectivamente).

Estas condiciones pueden influir en la biosíntesis de metabolitos secundarios del café, como los ácidos clorogénicos y otros compuestos fenólicos, que actúan como mecanismos de defensa ante estrés biótico y abiótico. Una mayor humedad relativa favorece la proliferación de hongos endófitos y patógenos, lo que puede inducir la acumulación de fenoles en el fruto. Además, la radiación solar y la temperatura afectan la tasa fotosintética y, por tanto, la disponibilidad de precursores para la síntesis de estos compuestos. En Umapata, el microambiente debido a la mayor altura de los árboles de cobertura podría modificar la incidencia de luz sobre los cafetales (INEGI, 2020).

Además de las condiciones agroclimáticas, los procesos postcosecha desempeñan un papel determinante en la composición fenólica del café. Entre las prácticas postcosecha, procesos como fermentación, lavado y secado pueden promover reacciones de unión o degradación de fenoles. La fermentación, ya sea natural, en mucílago o anaeróbica, es el proceso mediante el cual microorganismos como levaduras y bacterias lácticas y acéticas transforman azúcares y otros compuestos presentes en el mucílago. Posteriormente, el lavado elimina el mucílago y arrastra parte de los compuestos solubles una pérdida leve a moderada (5 a 20 %) de fenoles, dependiendo del volumen de agua y el número de enjuagues. El secado, ya sea al sol, en camas africanas o en secadores mecánicos, tiene como objetivo reducir la humedad a 10 a 12 %, aunque temperaturas elevadas superiores a 50 °C

pueden inducir oxidación y degradación térmica de los fenoles. Asimismo, las metodologías analíticas, desde la elección de solventes y técnicas de extracción (etanol, metanol, acetona, entre otros) hasta el uso de métodos avanzados como Folin–Ciocalteu o HPLC, pueden alterar significativamente la cuantificación total y el perfil de compuestos fenólicos identificados (Khoddami *et al.*, 2013).

Hecimovic *et al.* (2011) y colaboradores reportaron un contenido fenólico de 21.01 mg EAG/g para *Coffea arabica* L, sin especificar el tipo de beneficio, valor inferior al menor observado en el presente estudio de 49,58 mg EAG/ml. Los autores destacan que los granos de café verde contienen una proporción considerable de compuestos con actividad antioxidante, tales como ácidos clorogénicos, polifenoles y alcaloides. Esta riqueza fitoquímica se debe entre otras cosas a que, durante el desarrollo del grano, se acumulan compuestos fenólicos como parte de los mecanismos de defensa frente al estrés oxidativo, así como para funciones estructurales y metabólicas del embrión vegetal (Farah & Donangelo, 2006; Tfouni *et al.*, 2020). Entre estos compuestos fitoquímicos (que no fueron determinados en el presente estudio) más relevantes están los ácidos clorogénicos, representando hasta el 12 % del peso seco del grano verde, y desempeñan un papel clave como antioxidantes naturales (Erskine *et al.*, 2022). Asimismo, alcaloides como la cafeína y la trigonelina no solo poseen efectos bioactivos sobre el sistema nervioso, sino que también presentan propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Iriundo-DeHond *et al.*, 2020).

#### **7.1.5.1 Fenoles (método separación de solventes)**

La extracción por separación de solventes, típicamente empleando disolventes como metanol, etanol o acetato de etilo, permite una fraccionación más selectiva y la recuperación de subclases específicas de compuestos fenólicos. Esta técnica favorece la purificación y concentración de los fenoles, así como la obtención de otras familias de metabolitos como las saponinas, que también fueron importantes para este estudio facilitando posteriores análisis cualitativos y cuantitativos (Dai & Mumper, 2010). Además, la elección del solvente y su polaridad influyen directamente en la eficiencia de extracción de fenoles con diferentes estructuras químicas (Khoddami *et al.*, 2013).

El uso combinado de ambos métodos proporciona un análisis más completo Folin-Ciocalteu ofrece una cuantificación rápida y global de fenoles, mientras que la extracción por solventes permite estudiar la composición específica, incluidas las saponinas, y mejorar la pureza de los extractos para análisis más detallados. La explicación detallada y profunda de este compuesto puede consultarla en el apartado anterior.

#### **7.1.5.2 Beneficio**

En la presente investigación, los resultados correspondientes al contenido de fenoles totales evidenciaron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $36,48 \pm 6,78$  a  $21,18 \pm 0,21$   $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , como se muestra en el Cuadro 1, el mayor contenido de compuestos fenólicos se registró en el beneficio natural ( $36,48 \pm 6,78$   $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ), seguido por el beneficio *honey* ( $34,33 \pm 9,93$   $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),

mientras que la menor concentración se observó en el beneficio lavado ( $21,18 \pm 0,21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ). Estos resultados pueden atribuirse al contacto del grano con el mucílago (ya que es donde se encuentra la mayor cantidad de estos compuestos) durante el proceso de secado y como influyen en la retención o degradación de los compuestos fenólicos.

#### **7.1.5.3 Mineral**

Asimismo, se identificaron diferencias significativas estadísticamente en función del tipo de material mineral utilizado. En el Cuadro 1 se observa que los tratamientos sin zeolita presentaron una mayor concentración de fenoles ( $31,60 \pm 9,71 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), en comparación con los tratamientos que incluyeron zeolita ( $29,73 \pm 9,86 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ). Esta disminución podría explicarse por la capacidad adsorbente de la zeolita, la cual puede retener compuestos solubles como los polifenoles, reduciendo su disponibilidad en el producto final. Además, su uso puede modificar la cinética de secado, acelerando el proceso y alterando la distribución del calor, lo que podría afectar la estabilidad térmica de los fenoles durante el tratamiento postcosecha.

#### **7.1.5.4 Interacción**

La interacción entre el tipo de beneficio y el uso de zeolita también mostró diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ). El rango de valores obtenidos para esta variable es de  $21,10 \pm 0,26$  a  $43,40 \pm 0,36 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , como se muestra en el Cuadro 1, el mayor contenido de fenoles totales se obtuvo en el tratamiento de beneficio *honey* sin zeolita ( $43,40 \pm 0,36 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), seguido por el beneficio natural con zeolita ( $42,67 \pm 0,25 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ). En contraste, el menor valor se observó en el beneficio lavado sin zeolita ( $21,10 \pm 0,26 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ). Esta reducción podría vincularse

a la capacidad adsorbente de la zeolita, que al retener compuestos solubles como los polifenoles disminuye su disponibilidad en el extracto final (Mubeen *et al.*, 2024). Además, diversos estudios apuntan a que la zeolita, debido a su estructura porosa y alta superficie específica, pueden también actuar como portadores protectores de compuestos fenólicos, preservándolos de condiciones adversas como el calor o las reacciones oxidativas, aunque limitando su extracción inmediata.

Por otra parte, la zeolita modifica la cinética de secado mediante adsorción de humedad y exposición térmica acelerada. En sistemas de secado de café en lecho fluidizado con zeolita se ha demostrado que la reducción de la humedad relativa del aire y el incremento del gradiente térmico aceleran el secado.

Finalmente, se reconoce también que la adsorción selectiva de ciertos fenoles sobre la estructura aluminosilicatada de la zeolita puede ocurrir según propiedades como pH, polaridad o tamaño molecular del compuesto (Czaran *et al.*, 2012; Oancea *et al.*, 2024).

En comparación con estudios previos, los valores obtenidos en esta investigación resultan significativamente más bajos en un rango de  $21,10 \pm 0,26$  a  $43,40 \pm 0,36$   $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . Pérez *et al.* (2013) y colaboradores reportaron concentraciones de compuestos fenólicos totales en granos de *Coffea arabica* que oscilaron entre  $56,73 \pm 2,82$  y  $65,19 \pm 3,74$   $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , mientras que para *Coffea canephora* (café robusta) se alcanzaron valores aún más elevados, con un máximo de  $140,78 \pm 3,59$   $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . Estas diferencias podrían atribuirse a múltiples factores, tales como la variedad genética del grano, el tipo de manejo agronómico, las prácticas de beneficio y secado, así como la metodología utilizada para la extracción y

cuantificación de fenoles. Por ejemplo, se ha demostrado que la altitud y el clima influyen en la acumulación de metabolitos secundarios como los compuestos fenólicos (Worku *et al.*, 2018)b, y que diferentes variedades de *Coffea arabica* L. presentan perfiles fenólicos distintos (Montagnon *et al.*, 2019).

#### **7.1.6.1 Saponinas**

En el café, las saponinas se localizan principalmente en la cáscara y, en menor proporción, en el grano verde. Estas moléculas, pertenecientes a la clase de los glucósidos, poseen una estructura compuesta por una porción lipofílica (aglicona) unida a una parte hidrofílica (azúcares), lo que les confiere propiedades tensoactivas similares a las del jabón. En el café, las saponinas se localizan principalmente en la cáscara y, en menor proporción, en el grano verde. Estas moléculas, pertenecientes a la clase de los glucósidos triterpénicos, poseen una estructura compuesta por una porción lipofílica (aglicona) unida a una parte hidrofílica (azúcares), lo que les confiere propiedades tensoactivas similares a las del jabón. Gracias a esta estructura anfipática, las saponinas pueden reducir la tensión superficial del agua, lo que les permite formar espuma y emulsiones, contribuyendo así a la textura, estabilidad y características organolépticas del café, tales como la cremosidad y el cuerpo de la bebida (Lv *et al.*, 2021; Guerrero *et al.*, 2018). Además, las saponinas influyen en el perfil sensorial aportando notas de amargor y astringencia que enriquecen la complejidad del sabor (Farah, 2012).

#### **7.1.6.2 Beneficio**

Los resultados obtenidos en esta investigación revelaron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) en el contenido de saponinas según el tipo de beneficio

aplicado. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $191,12 \pm 2,43$  a  $233,65 \pm 5,07$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  como se muestra en el Cuadro 1, el mayor contenido se registró en el beneficio natural ( $233,65 \pm 5,07$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), seguido por el beneficio *honey* ( $222,55 \pm 1,58$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), mientras que el valor más bajo se observó en el beneficio lavado ( $191,12 \pm 2,43$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ). Un estudio de Suleman *et al.*, (2022) indica que la concentración moderada de saponinas en *Coffea arabica* L y *Coffea canephora* se encuentra entre 100 y 500  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ .

Las diferencias en la concentración de saponinas en café se explican por múltiples factores interrelacionados. La variedad genética es determinante *Coffea arabica* L. presenta niveles más bajos de saponinas, lo que contribuye a su menor amargor, mientras que *Coffea canephora* tiene niveles más altos, junto con mayor cafeína y otros compuestos amargos. Estas diferencias reflejan la capacidad de síntesis de metabolitos secundarios y la respuesta de cada variedad al estrés ambiental (Chen *et al.*, 2019).

Las prácticas agronómicas influyen directamente en la síntesis de saponinas, moléculas de defensa frente a estrés biótico y abiótico. Un exceso de nitrógeno tiende a reducir los compuestos secundarios, mientras que un manejo orgánico o nutrición balanceada puede estimular su producción mediante estrés moderado.

El tipo de suelo afecta la disponibilidad de nutrientes y el estrés fisiológico de la planta. Suelos volcánicos, bien drenados y ricos en potasio, calcio y magnesio favorecen niveles moderados de saponinas, mientras que altos niveles de materia orgánica contribuyen a una síntesis equilibrada y a mejorar la calidad química del grano.

La altitud condiciona temperatura, radiación solar y velocidad de maduración. A mayor altitud, la exposición a radiación UV y temperaturas bajas puede estimular la síntesis de metabolitos de defensa, incluidas las saponinas, aunque la maduración más lenta puede diluir algunos compuestos amargos, haciendo que el efecto no siempre sea lineal.

Las condiciones climáticas también modulan la concentración de saponinas. Temperaturas altas y radiación intensa aumentan su síntesis, mientras que humedad excesiva o lluvias continuas pueden disminuirla debido a menor estrés y dilución en los tejidos. Estrés combinado, como períodos secos seguidos de humedad, suele potenciar la acumulación de estos compuestos.

Finalmente, los métodos poscosecha afectan la concentración y el perfil de saponinas. Procesos como fermentación, lavado y secado influyen en la degradación o retención de estos compuestos, alterando así sus niveles finales en el grano (Suleman *et al.*, 2022).

Por otro lado, prácticas de manejo como el uso de fertilizantes orgánicos y el manejo del estrés hídrico pueden estimular la producción de metabolitos secundarios, incluyendo saponinas, al activar rutas biosintéticas relacionadas con la defensa vegetal (Kreuzwieser & Polle, 2013). El tipo de suelo también influye al afectar la disponibilidad de nutrientes y microbiota radicular; suelos bien drenados y ricos en materia orgánica se asocian con un mayor contenido de compuestos bioactivos (Alvarenga *et al.*, 2020), en el caso específico de la presente investigación los suelos en la zona de Temascaltepec provienen de una zona volcánica ya que están dentro de las faldas del Volcán Xinantécatl (Hombre desnudo) que le proporcionan al café,

suelos ricos en minerales esenciales, buen balance de retención y drenaje de agua, pH adecuado para absorción de nutrientes, suelos con buena actividad biológica, todo esto contribuye a plantas sanas, mayor rendimiento y cafés con mejor calidad en taza (Espinosa *et al.*, 2019). La altitud, con sus condiciones particulares de temperatura y radiación ultravioleta, puede inducir a las plantas a aumentar la síntesis de metabolitos antioxidantes como las saponinas para protegerse del estrés ambiental (Campa *et al.*, 2019).

Finalmente, las condiciones durante el proceso de beneficio, especialmente la exposición a radiación solar, afectan la estabilidad de las saponinas; la menor concentración observada en el café lavado podría estar relacionada con una mayor degradación inducida por la radiación UV durante el secado, mientras que el beneficio natural y *honey*, que mantienen el mucílago y la pulpa durante el secado, protegen en mayor medida estos compuestos (Yang *et al.*, 2021; Zhao *et al.*, 2020). El proceso de secado del café influye significativamente en la presencia de saponinas. Las altas temperaturas (> 40 a 50 °C) y tiempos prolongados de secado pueden degradar estas moléculas debido a su sensibilidad térmica y a la acción de enzimas y oxidación. Durante el secado húmedo o lavado, las saponinas, siendo parcialmente solubles en agua, pueden perderse por lixiviación, mientras que, en el secado natural al sol, donde hay menos contacto con agua, estas pérdidas son menores. El secado natural tiende a preservar mejor las saponinas, en contraste con el secado mecánico o artificial, que acelera su degradación por el calor. La disminución de saponinas afecta el perfil sensorial del café, ya que estas

contribuyen al amargor y la astringencia; sin embargo, un secado controlado puede mejorar la calidad en taza al reducir sabores no deseados asociados a saponinas en exceso. El tipo de beneficio o procesamiento postcosecha influye en la concentración de saponinas en los granos de café. En el beneficio húmedo o lavado, las saponinas pueden perderse considerablemente debido a la lixiviación durante el lavado y a la degradación enzimática y microbiana durante la fermentación, lo que reduce su contenido final. En contraste, el beneficio seco o natural conserva mayores niveles de saponinas, ya que el grano se seca con la pulpa intacta, evitando el contacto prolongado con agua; sin embargo, la descomposición de la pulpa puede alterar el perfil sensorial. El beneficio semihúmedo, que elimina parcialmente la pulpa dejando mucílago adherido, conserva un contenido intermedio de saponinas, entre el beneficio húmedo y seco (Yang *et al.*, 2021).

#### **7.1.6.3 Mineral**

Asimismo, se observaron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) en el contenido de saponinas con respecto al tipo de mineral utilizado en el secado. Los tratamientos sin zeolita mostraron una mayor concentración ( $218,32 \pm 18,41 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), mientras que los tratamientos con zeolita presentaron valores ligeramente inferiores ( $213,22 \pm 18,41 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), lo que sugiere un posible efecto del material adsorbente sobre la retención o degradación de estos compuestos. La interacción de la zeolita con algunas moléculas puede promover procesos de adsorción selectiva o incluso catalizar reacciones de oxidación leve, contribuyendo a la reducción del contenido de saponinas en el café secado con este mineral.

Por otro lado, la regulación del microclima que genera la zeolita podría también prevenir pérdidas excesivas de otros compuestos y preservar la calidad general del producto, lo que sugiere un balance entre protección y degradación según las condiciones específicas del secado (Martínez, Gómez, & Pérez, 2020).

#### **7.1.6.4 Interacción**

La interacción entre el tipo de beneficio y el tratamiento también arrojó diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ). El rango de valores obtenido para esta variable es de  $189,10 \pm 1,13$  a  $238,23 \pm 0,86$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  como se muestra en el Cuadro 1, el mayor contenido de saponinas se registró en el tratamiento de beneficio natural sin zeolita ( $238,23 \pm 0,86$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), seguido del beneficio *honey* sin zeolita ( $223,60 \pm 1,15$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), mientras que el menor valor correspondió al beneficio lavado con zeolita ( $189,10 \pm 1,13$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ). Estos resultados son superiores a los reportados por Mena *et al.* (2015), quienes, mediante extractos acuosos, cuantificaron  $173$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  de saponinas en semillas de *Sapindus saponaria* L., con alta cantidad de estos compuestos bioactivos con múltiples beneficios para la salud humana, incluyendo propiedades antimicrobianas, antiinflamatorias y antioxidantes, lo que las hace útiles tanto en aplicaciones farmacéuticas como cosméticas y agroindustriales.

La diferencia en la concentración de saponinas varía significativamente según la variedad vegetal; por ejemplo, especies como *Sapindus saponaria* son naturalmente ricas en saponinas triterpénicas, mientras que, en granos de café, su contenido puede diferir entre variedades *Coffea arabica* L. y *Coffea canephora* en una concentración entre  $100$  y  $500$   $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ . debido a diferencias genéticas y metabólicas. No obstante, en los datos reportados de la investigación se obtuvo

valores de  $189,10 \pm 1,13$  a  $238,23 \pm 0,86 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  los cuales se consideran bajos y no afectan la calidad del café. Además, las condiciones agroclimáticas, tales como la altitud, temperatura, radiación solar y humedad, afectan la biosíntesis y acumulación de saponinas, ya que estas moléculas actúan como metabolitos secundarios para la defensa vegetal ante estrés ambiental. El tipo de suelo también influye, ya que su composición mineral y pH pueden modificar la disponibilidad de nutrientes esenciales para la producción de compuestos bioactivos. En cuanto a las técnicas de extracción, métodos convencionales como los extractos acuosos pueden subestimar el contenido real de saponinas, mientras que técnicas avanzadas como la extracción asistida por ultrasonido o microondas aumentan la eficiencia al romper las paredes celulares y liberar mayor cantidad de estos compuestos, la explicación detallada ya se dio con anterioridad (Guo *et al.*, 2019).

La zeolita, al actuar como agente adsorbente, puede modificar la cinética de secado y la distribución térmica en los granos de café, las saponinas pueden degradarse o eliminarse debido a diversos mecanismos fisicoquímicos como la solubilización parcial en agua que favorece el arrastre de estas moléculas hacia la superficie del grano, donde se pierden con la evaporación, la exposición a temperaturas ( $> 50$  a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) y una exposición prolongada de 3 a 4 h provocando la ruptura de los enlaces glicosídicos, generando azúcares y aglicones, lo que incrementa la degradación térmica, oxidación y las reacciones con polifenoles o proteínas, catalizadas por enzimas aún activas (Oliveira *et al.*, 2017). El proceso de secado de los granos de café tiene como objetivo reducir la humedad interna hasta niveles seguros para su almacenamiento, preservando la calidad sensorial del producto. Este proceso

puede presentar problemas de baja uniformidad térmica, largos tiempos de secado y riesgo de sobrecalentamiento, además que parte de las saponinas se elimina junto con el mucílago durante el secado y el posterior trillado, impidiendo su retención en el grano verde (Tran *et al.*, 2020).

La incorporación de zeolita como material secante mejora significativamente las condiciones del aire de secado gracias a su alta capacidad de adsorción de humedad. Al disminuir la humedad relativa del aire, la zeolita incrementa el gradiente de presión de vapor entre la superficie del grano y el medio de secado, lo que acelera la transferencia de masa y aumenta la velocidad de secado. Como resultado, el tiempo total de secado se reduce (entre un 15 a 30 % según el sistema), y se prolonga el período de velocidad constante. Además, al no requerir temperaturas elevadas para lograr un secado eficiente, el proceso con zeolita mantiene una distribución térmica más homogénea dentro del lecho y entre los granos, evitando daños térmicos y mejorando la calidad final (color, aroma y estructura interna) (Pereira *et al.*, 2023).

Desde el punto de vista energético, el sistema con zeolita presenta una mayor eficiencia al aprovechar mejor el calor disponible y reducir el consumo energético global. En términos cinéticos, se observa un aumento del coeficiente de difusión efectiva ( $D_e$ ), indicando un transporte más rápido de la humedad desde el interior hacia la superficie del grano (Alves *et al.*, 2013). No obstante, se requieren estudios complementarios para comprender con mayor precisión la interacción entre la zeolita y las saponinas durante el secado (Ma *et al.*, 2023).

De manera similar, García (2010) reportó la presencia de saponinas en extractos de *Agave lechuguilla* y *Yucca filifera*, utilizando cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Las mayores concentraciones se encontraron en extractos obtenidos a partir de material vegetal fresco, con valores de 254,65 y 279,78 g·L<sup>-1</sup>, respectivamente. Este comportamiento puede atribuirse a que el material fresco conserva intactas las estructuras celulares y evita la degradación térmica, oxidativa o enzimática de compuestos bioactivos como las saponinas, procesos que suelen ocurrir durante el secado. Diversos estudios han demostrado que el secado, especialmente a temperaturas (> a 50 °C), puede reducir significativamente el contenido de saponinas y otros metabolitos secundarios debido a su sensibilidad al calor y a la exposición al oxígeno (Belay Legesse *et al.*, 2024; Nguyen & Tran, 2023). Los resultados, aunque elevados, son inferiores a los observados en esta investigación, posiblemente debido a diferencias en el tipo de material, frescura y condiciones de extracción. En general, los métodos de extracción más comunes para compuestos fenólicos y saponinas incluyen la extracción por maceración, extracción asistida por ultrasonido (EAU), extracción asistida por microondas (EAM) y extracción con fluidos supercríticos (EFS). Estudios comparativos han demostrado que las técnicas asistidas, especialmente la EAU y la EAM, suelen ser más eficientes y rápidas que la maceración tradicional debido a la ruptura celular facilitada por ondas ultrasónicas o microondas, lo que mejora la liberación de compuestos bioactivos (Chemat *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2021). No obstante, debido a las condiciones del lugar de investigación y a la falta de recursos para llevar a cabo el procedimiento completo, la extracción se realizó utilizando un

solvente. La mezcla de etanol y agua constituye un solvente polar ideal para la extracción de compuestos fenólicos y saponinas, ya que maximiza la solubilidad de estos compuestos y minimiza la coextracción de impurezas (Dai y Mumper, 2010).

#### **7.1.7.1 Azúcares Reductores**

Los azúcares reductores, como la glucosa y la fructosa, son carbohidratos simples que desempeñan un papel fundamental en la calidad del café, que poseen un grupo funcional libre (aldehído o cetona) capaz de reaccionar químicamente con otros compuestos, como los aminoácidos. Estos compuestos participan en la reacción de Maillard durante el proceso de tostado, generando una amplia gama de compuestos aromáticos y pigmentos responsables del color, aroma y sabor característicos del café (Belitz, Grosch y Schieberle, 2009). Además, están directamente relacionados con el dulzor percibido en taza y, por tanto, con su perfil sensorial general (Farah & Donangelo, 2006).

Otros azúcares presentes en el café, como la sacarosa, también contribuyen significativamente a la formación de aromas y sabores complejos durante el tueste, ya que su descomposición y reacciones químicas producen compuestos volátiles que aportan notas florales, afrutadas y caramelizadas (Buffo & Cardelli-Freire, 2004). La interacción entre estos azúcares y aminoácidos en la reacción de Maillard es clave para el desarrollo del aroma característico del café, que es uno de los principales atributos valorados por los consumidores (Gloess *et al.*, 2013).

### 7.1.7.2 Beneficio

En la presente investigación, los resultados obtenidos para el contenido de azúcares reductores mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $7,57 \pm 0,21$  g/L a  $9,38 \pm 0,28$  g/L como se muestra en el Cuadro 1, el mayor contenido se observó en el beneficio natural ( $9,38 \pm 0,28$  g/L), seguido por el beneficio *honey* ( $8,38 \pm 0,38$  g/L), mientras que el valor más bajo se registró en el beneficio lavado ( $7,57 \pm 0,21$  g/L).

La retención diferencial de azúcares reductores puede atribuirse a las características propias de cada método de beneficio. En los tratamientos natural y *honey*, el mucílago está compuesto principalmente por polisacáridos, como pectinas, hemicelulosas y ácidos urónicos, además de azúcares solubles como glucosa, galactosa y arabinosa (Farah, 2012). Este mucílago permanece parcial o totalmente adherido al grano durante el secado, lo que permite una mayor disponibilidad de azúcares (Bruyn *et al.*, 2022). Este mucílago actúa como una fuente directa de carbohidratos, cuya absorción o transferencia al grano puede intensificarse bajo ciertas condiciones de fermentación y deshidratación controlada. Durante la fermentación, las enzimas presentes en los microorganismos descomponen los polisacáridos del mucílago (principalmente pectinas, arabinogalactanos y glucanos) en azúcares simples, como glucosa, fructosa y manosa, que pueden ser absorbidos parcialmente por el grano, influyendo significativamente en su perfil sensorial final (Várady *et al.*, 2022). Las condiciones controladas de temperatura, tiempo y humedad durante la fermentación permiten

optimizar esta interacción, promoviendo el desarrollo de compuestos volátiles, ácidos orgánicos y precursores de aroma en el café (Campa *et al.*, 2019).

Asimismo, la deshidratación controlada, especialmente mediante secado lento y uniforme, contribuye a la preservación de estos compuestos, además de prevenir defectos físicos y la presencia de microorganismos no deseados. El secado gradual favorece una distribución más homogénea de los azúcares y otros metabolitos en el grano, lo que potencia la complejidad sensorial en taza (Selmar *et al.*, 2006).

En este contexto, los azúcares residuales se definen como aquellos azúcares simples que permanecen en la superficie o en las capas externas del grano de café después de la fermentación y antes o durante el secado. Estos azúcares no solo provienen del mucílago, sino también de la actividad enzimática y microbiana durante el beneficio. Su presencia puede influir en la composición química del grano y en la formación de compuestos aromáticos durante la tostión, aportando notas dulces, frutales o florales al perfil sensorial del café (Várady *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2015).

En contraste, mediante el proceso de lavado elimina casi por completo esta la pulpa de café antes del secado, reduciendo significativamente la cantidad de azúcares residuales. Esta ausencia puede restringir la actividad microbiológica benéfica durante el secado y limitar la formación de metabolitos volátiles deseables, lo que puede traducirse en cafés con perfiles más limpios y brillantes, pero menos complejos en términos de dulzor o cuerpo (Bastian *et al.*, 2021).

### 7.1.7.3 Interacción

En cuanto al efecto del uso de zeolita y su interacción con los métodos de beneficio, también se observaron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ). El rango de valores obtenidos para esta variable es de  $7,40 \pm 0,10$  a  $9,43 \pm 0,30$  g/L como se muestra en el Cuadro 1, el mayor contenido de azúcares reductores se obtuvo en el tratamiento de beneficio lavado con zeolita ( $9,43 \pm 0,30$  g/L), seguido por el beneficio natural sin zeolita ( $9,33 \pm 0,32$  g/L), mientras que la menor concentración se registró en el beneficio lavado sin zeolita ( $7,40 \pm 0,10$  g/L). Estos resultados sugieren que la zeolita, al actuar como agente modulador del microambiente de secado, podría contribuir a minimizar la degradación térmica de los azúcares reductores, incluso en procesos de beneficio que típicamente muestran menor retención de estos compuestos (Huang *et al.*, 2025). En este sentido, Borém *et al.* (2014), demostraron que el uso de temperaturas de secado elevadas ( $> 50$  °C), acelera el deterioro de la calidad del café durante el almacenamiento, mientras que temperaturas moderadas, como  $40$  °C, preservan mejor los atributos sensoriales y la integridad de compuestos termosensibles. Por lo tanto, es posible que la zeolita ayude a atenuar los efectos negativos del calor durante el secado, manteniendo condiciones térmicas más estables y favoreciendo así la conservación de azúcares reductores (Borém *et al.*, 2014 a).

Comparativamente, Urrunaga *et al.* (2024) reportaron concentraciones de azúcares reductores en el rango de  $2,70 \pm 0,08$  a  $2,99 \pm 0,10$  g/L, valores considerablemente inferiores a los encontrados en el presente estudio que están en un rango de

7,40 ± 0,10 a 9,43 ± 0,30 g/L. La concentración de azúcares reductores en el café depende de múltiples factores, incluyendo la variedad (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora*), genética de la planta, grado de madurez del fruto (18 a 24 °Brix), las condiciones de cultivo (luz, temperatura, disponibilidad de agua y nutrientes afectando la fotosíntesis y la acumulación de carbohidratos), el procesamiento postcosecha la fermentación en el beneficio húmedo permite que las levaduras consuman parte de los azúcares, el secado y el almacenamiento puede generar degradación térmica u oxidativa, bajo determinadas condiciones de humedad.

A nivel enzimático, enzimas presentes en el grano verde, como invertasas y amilasas, hidrolizan sacarosa y polisacáridos, aumentando temporalmente los azúcares reductores, que posteriormente son consumidos durante el tostado en reacciones de Maillard, contribuyendo al desarrollo de aroma, color y sabor del café, pero reduciendo la concentración final de estos compuestos (Ferreira *et al.*, 2023).

Las variedades *Coffea arabica* L. y *Coffea canephora*, presentan distinta capacidad para sintetizar y almacenar azúcares, acumulando mayoritariamente glucosa y fructosa o, en algunos casos, sacarosa no reductora. La madurez del fruto también influye, ya que los frutos maduros contienen más azúcares libres y reductores que los frutos verdes, y la proporción entre azúcares reductores y sacarosa varía a medida que esta última se acumula y los monosacáridos se transforman (Barbosa *et al.*, 2012).

Estos resultados sugieren que la zeolita actúa como modulador del microambiente durante el secado, regulando la humedad, temperatura, y reduciendo la pérdida de compuestos termosensibles (Alonso *et al.*, 2016).

Durante el secado a 45-50 °C, aunque no se alcanzan temperaturas suficientes para inducir reacciones de caramelización (> 160 °C) o reacción de Maillard (> 140 °C), sí pueden ocurrir pérdidas fisiológicas o alteraciones celulares por estrés térmico prolongado. A temperaturas superiores a 40 °C, se ha documentado una disminución en la viabilidad del grano y en la integridad de compuestos sensibles como los azúcares reductores (Borem *et al.*, 2008; Ramírez *et al.*, 2014). En cuanto al origen de estos azúcares, durante el desarrollo del fruto del café se produce una transición metabólica en etapas tempranas, predominan glucosa y fructosa en el perispermo, pero en la madurez, la sacarosa se convierte en el principal azúcar almacenado en el endospermo. Esta se sintetiza a partir de productos de la fotosíntesis mediante rutas que involucran enzimas como la sacarosa sintasa y sacarosa fosfato sintasa (Geromel *et al.*, 2006).

#### **7.1.8.1 Antioxidantes**

Los antioxidantes son compuestos que inhiben procesos de oxidación al neutralizar radicales libres, previniendo así el deterioro celular y químico. En el café, los principales antioxidantes incluyen ácidos clorogénicos, así como otros compuestos fenólicos, que no solo aportan beneficios para la salud humana por su actividad antiinflamatoria y capacidad de reducir el riesgo de enfermedades crónicas, sino que también contribuyen a preservar la calidad del grano durante el almacenamiento, al protegerlo contra la oxidación lipídica y la pérdida de compuestos volátiles responsables del aroma (Fujioka & Shibamoto, 2008; Farah, 2012).

### 7.1.8.2 Beneficio

En la presente investigación, los resultados de actividad antioxidante mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $8494,17 \pm 65,99$  a  $9405,00 \pm 21,21$   $\mu\text{mol Trolox/g}$  como se muestra en el Cuadro 1, el mayor contenido de antioxidantes se registró en el beneficio natural ( $9405,00 \pm 21,21$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ ), seguido por el beneficio *honey* ( $9058,17 \pm 67,82$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ ), mientras que la menor concentración se observó en el beneficio lavado ( $8494,17 \pm 65,99$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ ).

Los antioxidantes presentes en el café verde, especialmente los ácidos clorogénicos, son compuestos fenólicos de gran importancia para la calidad y las propiedades funcionales del grano (Erskine *et al.*, 2022). Estos compuestos no solo actúan como agentes neutralizadores de radicales libres, aportando beneficios para la salud humana, sino que también están directamente relacionados con la estabilidad química del grano durante el almacenamiento, ya que previenen la oxidación de lípidos y proteínas (Farah & Donangelo, 2006).

Así, el contenido de ácidos clorogénicos y otros fenoles no solo tienen valor nutricional, sino que también representan un indicador de calidad del grano, ya que influye en su resistencia al deterioro, su comportamiento en el proceso de tostado y su valor como ingrediente funcional en la industria alimentaria y nutracéutica (Silva, Ferreira, & Moreira, 2018a).

Estos hallazgos se relacionan directamente con la cantidad de fenoles presentes en los granos y con el grado de contacto que estos mantienen con el mucílago y las

capas externas del fruto (Esquivel & Jiménez, 2012). En los métodos natural y *honey*, el grano permanece en contacto prolongado con el mucílago durante el secado, lo cual facilita la transferencia de compuestos fenólicos, como los ácidos clorogénicos, desde las capas externas hacia el grano, elevando su capacidad antioxidante (Joët *et al.*, 2010). En contraste, el método lavado remueve esas capas antes del secado, lo que podría reducir la transferencia y retención de estos compuestos beneficiosos (Várady *et al.*, 2022). Además, estudios han evidenciado que el contenido total de polifenoles y actividad antioxidante suele ser mayor en granos obtenidos mediante procesamiento natural o fermentaciones controladas (comparado con lavado), lo que explica la diferencia observada entre los métodos evaluados y valores obtenidos en la presente investigación (Várady *et al.*, 2022).

En altitudes entre 800 y 2 100 m s. n. m., donde la radiación es intensa pero las temperaturas son moderadas, se favorece una maduración más lenta y una mayor acumulación de azúcares y compuestos aromáticos (Campa *et al.*, 2019). La radiación solar influye de forma determinante en el desarrollo del fruto del café y en la composición química del grano estimula la síntesis de metabolitos secundarios como ácidos clorogénicos y flavonoides, que actúan como antioxidantes naturales previniendo el estrés oxidativo y la radiación ultravioleta (Abubakar *et al.*, 2024). Adicionalmente, el aumento de temperatura provocado por la exposición solar directa intensifica la degradación térmica de estos metabolitos, en particular cuando se superan los 45 °C de forma prolongada (Selmar *et al.*, 2006).

La sombra parcial (40 a 60 % de luz filtrada) mantiene un equilibrio óptimo entre fotosíntesis, síntesis de antioxidantes y protección del grano, produciendo cafés de mejor calidad química y sensorial (Ferreira *et al.*, 2022).

Hablando del beneficio y en este sentido, el uso de sistemas de secado controlados, como el invernadero utilizado en este estudio, constituye una estrategia eficaz para mitigar los efectos negativos de la radiación UV y del calor excesivo. El invernadero actúa como un filtro que reduce la incidencia directa de luz UV y permite una ventilación moderada, lo que ayuda a mantener temperaturas internas más estables y condiciones de secado más suaves. Estas condiciones favorecen la conservación de los compuestos antioxidantes y fenoles totales, preservando así la calidad funcional y sensorial del café verde (Borém *et al.*, 2013; Joët *et al.*, 2010). Se considera probable que la concentración de compuestos haya sido mayor al inicio del secado, por lo que sería necesario realizar un nuevo estudio en la zona de Temascaltepec para confirmar esta hipótesis.

#### **7.1.8.3 Mineral**

Respecto al tipo de mineral utilizado durante el secado, se observaron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ). En el Cuadro 1, se muestran los tratamientos sin zeolita presentando un mayor contenido de compuestos antioxidante ( $9030,56 \pm 385,30 \mu\text{mol Trolox/g}$ ) en comparación con los tratamientos con zeolita ( $8441,00 \pm 412,21 \mu\text{mol Trolox/g}$ ). Aunque la zeolita es reconocida por su capacidad para adsorber humedad relativa y facilitar un secado más eficiente, su uso puede estar asociado con una reducción en el contenido de compuestos antioxidantes. Este fenómeno podría atribuirse a que, bajo condiciones extremas, la

zeolita acelera el proceso de secado hasta generar un ambiente propicio para el estrés oxidativo, favoreciendo la oxidación de compuestos fenólicos. Sin embargo, este efecto no se observó en la presente investigación. Asimismo, la creación de un ambiente extremadamente seco podría activar reacciones enzimáticas o promover la desnaturalización de enzimas antioxidantes naturales del grano (Bruyn *et al.*, 2022). También es posible que propiedades superficiales de la zeolita favorezcan interacciones químicas que adsorben o degradan compuestos antioxidantes como los ácidos clorogénicos. Por lo tanto, aunque la zeolita mejora la eficiencia del secado, un manejo inapropiado puede comprometer la calidad funcional del café (Farah, 2012).

#### **7.1.8.4 Interacción**

Los resultados para la interacción entre el tipo de beneficio y el uso de zeolita mostraron diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ). El rango de valores obtenido para esta variable es de  $8440,00 \pm 25,00$  a  $9423,33 \pm 10,41$   $\mu\text{mol Trolox/g}$  como se muestra en el Cuadro 1, el mayor contenido antioxidante se registró en el beneficio natural sin zeolita ( $9423,33 \pm 10,41$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ ), seguido por el beneficio *honey* con zeolita ( $9120,00 \pm 5,00$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ ). En contraste, la menor concentración se observó en el beneficio lavado con zeolita ( $8440,00 \pm 25,00$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ ), lo que indica que tanto el tipo de procesamiento como la presencia del mineral en el proceso de secado influyen significativamente en la retención de compuestos fenólicos antioxidantes.

Estos resultados reflejan que los métodos de beneficio que mantienen mayor contacto del grano con el mucílago (como el natural y el *honey*) tienden a conservar

una mayor cantidad de ácidos clorogénicos y otros polifenoles, ya que estos compuestos se encuentran en altas concentraciones en las capas externas del fruto y pueden transferirse al endospermo durante el secado (Esquivel & Jiménez, 2012; Farah, 2012).

Por otro lado, el uso de zeolita como aditivo durante el secado podría haber influido en la modulación de la humedad y temperatura local, lo que favorecería una mayor estabilidad térmica y oxidativa de los compuestos bioactivos. Se ha propuesto que las zeolitas, al actuar como adsorbentes de humedad y reguladores del microambiente, pueden disminuir la formación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y limitar la oxidación de compuestos sensibles como los polifenoles (Faghihian & Peyvandi, 2012). No obstante, en el beneficio lavado, donde el mucílago se elimina por completo antes del secado, la zeolita no tendría el mismo efecto protector sobre los compuestos antioxidantes, ya que la base fenólica del grano es menor desde el inicio del secado.

Comparativamente, Urruaga *et al.* (2024) reportaron una actividad antioxidante en café natural de  $75,73 \pm 1,07 \mu\text{g/mL}$ , para *Coffea arabica* L. sin especificar el beneficio de  $89,03 \pm 2,86 \mu\text{g/mL}$ . Los valores obtenidos en el presente estudio superan considerablemente estos reportes, lo cual podría atribuirse a diferencias en el tipo de café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora*), condiciones de procesamiento (Natural, *honey* y lavado) y metodología analítica (ABTS, DPPH, FRAP, entre otras). Además, la actividad antioxidante del café está influenciada por múltiples factores, entre ellos el contenido y la composición de compuestos

fenólicos, como los ácidos clorogénicos, así como el método de secado, el grado de madurez del fruto que se traduce en la cantidad de grados brix misma que está entre (18 a 24 °Brix), la altitud de cultivo de 800 a 2 100 m s. n. m. y la variedad genética (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora*), (Farah & Donangelo, 2006; Esquivel & Jiménez, 2012). El uso de técnicas como el secado en invernadero (zarandas, camas africanas o directamente en el suelo), empleado en este estudio, podría haber favorecido una mayor retención de compuestos antioxidantes al minimizar la degradación térmica y fotooxidativa, particularmente en procesos naturales y *honey* donde los granos permanecen en contacto con el mucílago, fuente importante de metabolitos bioactivos (Joët *et al.*, 2010).

Por otro lado, las diferencias también pueden reflejar variaciones en los métodos de determinación antioxidante, ya que la elección del ensayo (por ejemplo, DPPH, ABTS, FRAP) y las condiciones experimentales pueden alterar los resultados obtenidos, haciendo que los valores no sean completamente comparables entre estudios (Apak *et al.*, 2022).

Asimismo, Pérez *et al.* (2013), empleando el método de Kuskoski *et al.*, (2005) basado en la neutralización del radical ABTS·+ con estándar Trolox, reportaron capacidades antioxidantes entre  $209,29 \pm 6,72$  y  $681,72 \pm 37,81$   $\mu\text{mol eq. Trolox/g}$ . En comparación, los valores de esta investigación son sustancialmente superiores, posiblemente debido a particularidades agroclimáticas de la región de Temascaltepec, región ubicada en el sur del Estado de México, caracterizada por una altitud media de 1 300 a 2 100 m s. n. m., temperaturas moderadas entre 18 a 22 °C, radiación solar ( $4.5 \text{ kWh m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y humedad (55–60 %), estas condiciones

favorecen la síntesis de metabolitos secundarios, como los compuestos fenólicos (Joët *et al.*, 2010), y a las condiciones específicas del secado empleado, que para este caso fue secado en zarandas bajo condiciones de invernadero, este sistema que permite una ventilación uniforme, evita la exposición directa a la radiación ultravioleta y modera la temperatura del secado (manteniéndose entre 35 y 45 °C). No obstante, como ya se dijo el uso de zeolita, bajo ciertas condiciones, puede no favorecer la conservación de compuestos antioxidantes. Aunque las zeolitas son conocidas por sus propiedades adsorbentes y su capacidad para regular humedad, su uso puede modificar el microambiente de secado, acelerando la deshidratación o alterando el equilibrio hídrico superficial del grano (Fernández, 2019). Este fenómeno podría afectar negativamente la estabilidad y retención de compuestos fenólicos, especialmente en condiciones donde el mucílago ha sido removido (beneficio lavado), reduciendo la protección física del grano frente a la oxidación (Faghihian & Peyvandi, 2012; Várady *et al.*, 2022). Además, algunos estudios sugieren que ciertos materiales adsorbentes como zeolitas, arcillas activadas (bentonita, montmorillonita), carbones activados, o sílices con estructuras porosas que interactúan con moléculas polares mediante intercambio iónico y enlaces de hidrógeno., bajo altas temperaturas o humedad, pueden catalizar la descomposición de azúcares o fenoles que pueden interactuar con metabolitos polares, provocando su adsorción parcial o su descomposición en presencia de humedad residual y temperatura (Nguyen & Tran, 2023).

### **7.1.9.1 pH**

El pH es una medida que indica la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) en una solución, determinando su grado de acidez o alcalinidad. Se expresa en una escala que va de 0 a 14, donde valores bajos indican acidez y valores altos alcalinidad. En el café, el pH influye directamente en el perfil sensorial, especialmente en la percepción de acidez, además de afectar la estabilidad química y microbiológica del producto, siendo un parámetro clave durante el procesamiento, almacenamiento y evaluación de calidad (Shofinita *et al.*, 2024).

### **7.1.9.2 Beneficio**

En la presente investigación, los resultados de pH mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $6,21 \pm 0,061$  a  $6,26 \pm 0,027$  como se muestra en el Cuadro 1, el mayor valor de pH se registró en el beneficio *honey* ( $6,26 \pm 0,027$ ), seguido por el beneficio lavado ( $6,22 \pm 0,038$ ), mientras que el beneficio natural presentó el valor más bajo ( $6,21 \pm 0,061$ ).

De acuerdo con Lagunes *et al.* (2019), el pH del café verde suele oscilar entre 4,5 a 6,0, determinado por factores como el método de beneficio, la variedad de cafeto, las características del suelo y las condiciones de secado. En primer lugar, el método de beneficio tiene un impacto directo sobre el pH, ya que determina el tiempo de contacto del grano con el mucílago y la intensidad de la fermentación. Métodos como el natural y el *honey*, que retienen más componentes del fruto durante el secado, suelen generar una mayor acumulación de ácidos orgánicos derivados de

la actividad microbiana, lo que tiende a disminuir el pH del grano final (Várady *et al.*, 2022; Lee *et al.*, 2015).

La variedad genética del cafeto influye significativamente en la composición química y sensorial del grano, ya que diferentes variedades presentan perfiles metabólicos y concentraciones variables de compuestos como los ácidos clorogénicos y málicos, que contribuyen a la acidez total y libre. Por ejemplo, las variedades Caturra y Bourbon se caracterizan por una acidez elevada y buena dulzura, mientras que la variedad Typica aporta una acidez equilibrada y un aroma más complejo. Por su parte, *Coffea canephora* (robusta) presenta menor acidez, mayor amargor y cuerpo más intenso.

Además, cada variedad genética difiere en el contenido de azúcares reductores, los cuales influyen en el dulzor y en las reacciones de Maillard durante el tostado, así como en los ácidos orgánicos responsables de la acidez y notas frutales. Los compuestos aromáticos presentes determinan finalmente el perfil de sabor del café, incluyendo notas florales, cítricas, y de chocolate (Joët *et al.*, 2010).

En cuanto a las características del suelo, parámetros como el pH edáfico, el contenido de materia orgánica, la disponibilidad de calcio y magnesio, y la capacidad de intercambio catiónico, afectan la nutrición de la planta y, por tanto, la síntesis de metabolitos secundarios que modulan la acidez del fruto (Avelino *et al.*, 2005 b). Suelos más ácidos, por ejemplo, tienden a favorecer una mayor expresión de acidez sensorial en el café. Los compuestos de café a un pH ácido de (4–5), los compuestos fenólicos como los ácidos clorogénicos son relativamente estables.

Los compuestos fenólicos presentan estabilidad variable según el pH del medio. A pH superiores a 6–7 correspondientes a condiciones (ligeramente neutro a alcalino), los fenólicos son más susceptibles a degradación por oxidación y reacciones de hidrólisis, proceso que se acelera en presencia de calor u oxígeno. Por otro lado, en condiciones extremadamente ácidas ( $\text{pH} < 3$ ), también puede producirse degradación por hidrólisis ácida, aunque este fenómeno es menos frecuente en matrices como el café (Bumbaugh *et al.*, 2025).

Finalmente, las condiciones de secado, especialmente la temperatura, la velocidad de deshidratación y el tipo de infraestructura (como el uso de zarandas bajo invernadero), influyen en la concentración de ácidos orgánicos. Un secado lento y controlado permite una mayor estabilidad del pH, mientras que condiciones extremas pueden acelerar la degradación de compuestos volátiles y fenólicos, afectando tanto la acidez como la calidad sensorial (Selmar *et al.*, 2006; Farah & Donangelo, 2006).

Un pH significativamente bajo puede ser indicativo de un proceso de sobrefermentación, que repercute negativamente en la calidad sensorial del café, generando perfiles de sabor no deseables, como notas excesivamente ácidas o avinagradas. Esto se debe a la acumulación de ácidos orgánicos de bajo peso molecular, como el ácido acético, láctico, málico y succínico, que se generan durante la fermentación microbiana del mucílago y pueden penetrar parcialmente el grano (Silva *et al.*, 2008). El ácido acético, en particular, está estrechamente

asociado con el desarrollo de sabores agrios o avinagrados cuando su concentración supera ciertos umbrales sensoriales (Sunarharum *et al.*, 2014).

En contraste, un pH moderado y estable favorece un perfil sensorial equilibrado, con una acidez agradable y un sabor armónico. Además, este equilibrio contribuye a la preservación de compuestos fenólicos con actividad antioxidante, relevantes tanto para la estabilidad del producto como para sus propiedades funcionales (Fatmawati *et al.*, 2022).

En conclusión, estudios han demostrado que el café con niveles elevados de estos ácidos presenta valores de pH más bajos, lo que se traduce en perfiles sensoriales menos balanceados y mayor riesgo de defectos (Lee *et al.*, 2015). En contraste, un pH moderado y estable, asociado con una fermentación controlada y un secado adecuado, favorece un perfil sensorial equilibrado, con una acidez brillante pero agradable, típicamente valorada en cafés de especialidad (Joët *et al.*, 2010).

### **7.1.9.3 Interacción**

Finalmente, los resultados obtenidos para la interacción entre tipo de beneficio y tratamiento mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ). El rango de valores obtenido para esta variable es de  $6,16 \pm 0,006$  a  $6,28 \pm 0,006$  como se muestra en el Cuadro 1, el mayor valor de pH se registró en el beneficio *honey* con zeolita ( $6,28 \pm 0,006$ ), seguido por el método *honey* sin zeolita ( $6,24 \pm 0,020$ ), mientras que el menor valor correspondió al beneficio natural con zeolita ( $6,16 \pm 0,006$ ). Estos hallazgos pueden explicarse en parte por la influencia del

método *honey* en la retención de mucílago, que favorece una mayor actividad microbiana durante la fermentación. Para la fermentación del café (específicamente en el beneficio húmedo), el pH ideal del mucílago durante el proceso es un factor crítico para obtener un café de alta calidad, con acidez equilibrada y buen perfil aromático.

El rango óptimo de pH para la fermentación del café *Coffea arabica* L. se sitúa entre 4,5 y 5,5. En este intervalo se favorece la actividad de levaduras y bacterias lácticas beneficiosas, lo que promueve la producción moderada de ácidos orgánicos y contribuye a una acidez brillante con aromas frutales.

Valores de pH superiores a ( $> 6$ ) alteran este equilibrio microbiano. Las levaduras (*Saccharomyces*, *Pichia*, *Candida*) permanecen activas, aunque su capacidad fermentativa y la generación de compuestos aromáticos volátiles, como ésteres y alcoholes, disminuyen ligeramente. En el caso de las bacterias lácticas (*Lactobacillus*, *Leuconostoc*), su actividad se reduce debido a que su pH óptimo es más ácido (4 a 5), lo que conlleva una menor producción de ácido láctico y, por tanto, una acidez final menos pronunciada. Por otro lado, las bacterias acéticas y otros microorganismos (*Acetobacter*, *Bacillus*, *Enterobacteriaceae*) se ven favorecidos en condiciones próximas a la neutralidad, lo que incrementa el riesgo de fermentaciones no deseadas que originan sabores avinagrados o amargos (Hernández *et al.*, 2022).

Hu *et al.* (2025) demostraron que diferentes niveles de retención de mucílago en el proceso *honey* afectan la diversidad microbiana y la composición de compuestos volátiles en el café, lo que impacta la química del grano y puede modificar

parámetros como el pH. Aunque este estudio no se centra directamente en el café verde, sus hallazgos sugieren que la zeolita puede modificar el ambiente químico y microbiano durante el procesamiento del café, lo que podría explicar las variaciones en el pH observadas en tu estudio.

Los resultados indican que el pH del café verde varió significativamente según el tipo de beneficio y el uso de zeolita. El mayor pH se observó en el beneficio *honey* con zeolita, lo que sugiere una menor acumulación de ácidos orgánicos posiblemente debido al control de humedad que ofrece este mineral, favoreciendo una fermentación más estable. En contraste, el beneficio natural con zeolita mostró el menor pH, lo cual podría estar relacionado con una alteración del equilibrio microbiano durante el secado, favoreciendo la producción de ácidos como el acético o láctico (Silva *et al.*, 2008b; Faghihian & Peyvandi, 2012).

#### **7.1.10 Resultados de Color**

El color del café es un indicador clave de su calidad, proceso de secado y tueste, y puede influir tanto en la percepción sensorial como en la química interna del grano (Kato *et al.*, 2016).

En el círculo cromático (Figura 5) se muestran los seis puntos que corresponden a las interacciones asociadas con las muestras de café molido provenientes de los diferentes métodos de beneficio.

En el caso del café verde, el análisis del color puede realizarse mediante el sistema CIELAB, que permite una caracterización precisa del color en tres dimensiones:

luminosidad ( $L^*$ ), eje rojo-verde ( $a^*$ ) y eje amarillo-azul ( $b^*$ ). El color del café verde, a pesar de no haber pasado por el proceso de tostado, representa un parámetro clave para la evaluación de calidad. Este atributo visual se asocia con el grado de madurez del fruto, las condiciones de fermentación y secado, así como con posibles deterioros durante el almacenamiento. Por tanto, el color influye directamente en la percepción sensorial y comercial del producto, afectando la valoración de los lotes por parte de compradores y tostadores, y repercutiendo en su precio y aceptación en el mercado (González *et al.*, 2024).

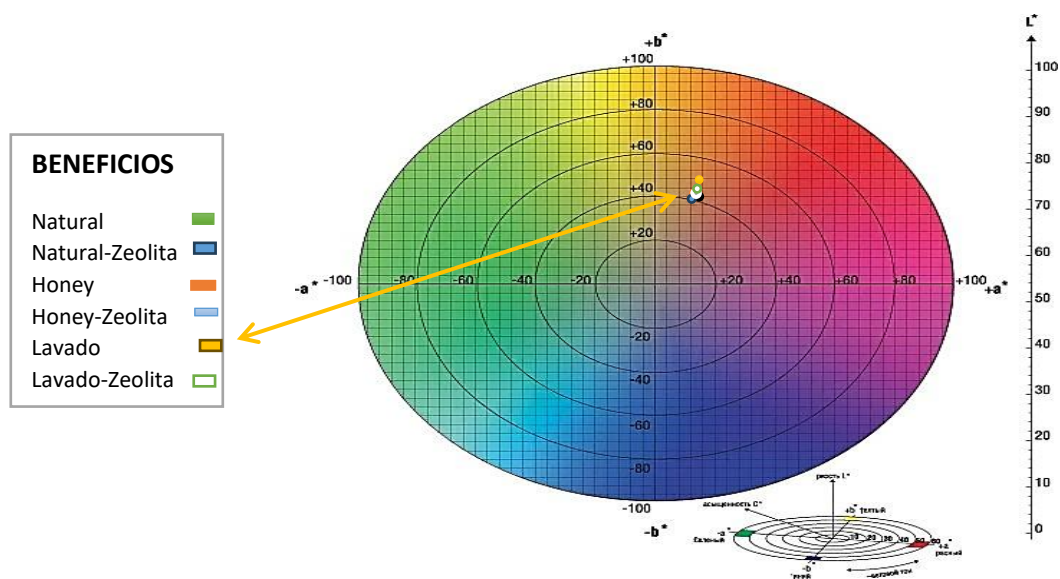


Figura 6 Círculo cromático, para presentar las muestras de café molido verde.  
Fuente: Kupeers, 2002

En la figura 5, se observan las coordenadas de color de los componentes  $a^*$  y  $b^*$  de las muestras en café molido verde. Los puntos indican los valores de cada muestra de café molido con valor de 1,71 en  $a^*$  y 22,51 en  $b^*$  que dan tonalidades verdes a ligeramente amarilla, los valores máximos son de 3,46 a 24,03 acercándose a tonos rojos. Al igual que en los otros puntos, se muestran las diferentes muestras de acuerdo con el tipo de beneficio.

### 7.1.10.1 Color a\*

En la presente investigación, los resultados de actividad antioxidante mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $2,07 \pm 0,39$  a  $3,26 \pm 0,27$  como se observa en el Cuadro 2, la mayor coordenada a\* se registró en el beneficio natural ( $3,26 \pm 0,27$ ), seguido por el beneficio lavado ( $2,23 \pm 0,19$ ), mientras que el menor valor se observó en el beneficio *honey* ( $2,07 \pm 0,39$ ). González *et al.* (2024) reporta valores que van de  $2,35 \pm 0,54$  a  $3,34 \pm 0,29$ , indicando una tonalidad verde. Valores más positivos corresponden a un verde más intenso, lo cual es indicativo de madurez y frescura. Por ejemplo, un valor de ( $> 6$ ) señala granos bien maduros y frescos, con menor oxidación, mejor conservación de compuestos fenólicos y menor riesgo de defectos. En cambio, un valor de ( $-2$ ) puede indicar granos menos maduros, ligera sobremaduración o inicio de oxidación, reflejando menor frescura y posible pérdida de calidad sensorial.

En la Figura 5, puede verse en el componente a\* de color las diferentes muestras de dicha variable para las moliendas de café. Los valores encontrados fueron de 2,06 a 3,46 para *Coffea arabica* L., variedad Caturra.

El color del café molido verde es una percepción del resultado de la respuesta visual a la radiación luminosa en el espectro visible, cuantificable mediante la colorimetría CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), donde  $a^*$  representa el eje rojo-verde. En granos verdes de café, los valores de  $a^*$  suelen ser bajos o negativos, indicando tonalidades verdosas, mientras que durante el tueste ascienden hacia valores más rojizos debido a reacciones de pardeamiento. Por otro lado, una tonalidad menos verde en el café

secado al sol puede deberse a la degradación de algunos pigmentos como clorofilas y carotenoides causada por la radiación ultravioleta (UV), que logra penetrar el pergamino y llegar hasta la almendra durante el secado (Tan *et al.*, 2024).

Es una coordenada cromática que va de +a\* (positivo) que indica rojo y hasta, a\* (negativo) que indica verde. Los valores máximos para obtener son 60 positivo, pasando por 0, hasta 60 negativo, que sería verde. Como era de esperarse, las muestras de café son verdes y en especial estas, presentaron tonalidades claras, pues estuvieron cercanos 2. Desde 2,06 en verde hasta 3,46 en amarillo.

Finalmente, es importante destacar que el análisis de color realizado en el café verde molido buscó determinar si la aplicación de zeolita durante el proceso afecta tanto la calidad como las características visuales del grano. Dado que el color es un factor clave en la percepción de calidad y atracción visual del café, evaluar cualquier posible cambio es fundamental para asegurar que la zeolita no altere negativamente la apariencia ni la calidad del producto.

#### **7.1.10.2 Color b\***

En la presente investigación, los resultados de actividad antioxidante mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $22,75 \pm 0,39$  a  $23,83 \pm 0,38$  como se muestra en el cuadro 2. El beneficio natural presentó la mayor coordenada b\* ( $23,83 \pm 0,38$ ), seguido por el beneficio lavado ( $23,16 \pm 0,25$ ), y el menor valor se observó en el beneficio *honey* ( $22,75 \pm 0,39$ ).

En la Figura 5, puede verse en su componente  $b^*$  las diferentes muestras de dicha variable para las moliendas de café en verde. Iniciando con valores de 22,55 a 24,03 para *Coffea arabica* L., variedad Caturra. González *et al.* (2024), reporta valores de 10,93 a 12,58 mencionando que en general, valores moderadamente positivos de  $b^*$  (indicando un matiz amarillento controlado) podrían interpretarse como indicativos de granos bien procesados, con menor riesgo de decoloración u oxidación excesiva. Por el contrario, valores muy elevados de  $b^*$  podrían sugerir un tono amarillento excesivo, ligado a secado rápido o exposición prolongada a luz/aire, lo cual puede comprometer la frescura y calidad del grano. Dado que no se han establecido rangos específicos para  $b^*$  en verde, se recomienda usar este parámetro en conjunto con  $a^*$ ,  $L^*$  y otros indicadores de calidad del café.

En función de la interacción tipo de beneficio y tratamiento, el mayor valor se observó en el beneficio natural sin zeolita ( $24,03 \pm 0,45$ ), seguido por el beneficio natural con zeolita ( $23,64 \pm 0,21$ ), mientras que el menor se encontró en el beneficio *honey* sin zeolita ( $22,51 \pm 0,42$ ). Los resultados indican que el secado a temperaturas moderadas, alrededor de  $40^\circ\text{C}$ , ayuda a conservar la coloración azul-verdosa típica de los granos de café verde de alta calidad, en contraste con procesos a temperaturas más elevadas. Estudios recientes muestran que el secado a  $50^\circ\text{C}$  o más produce aumentos en la luminosidad ( $L$ ) y el componente  $b^*$  del espacio de color CIELAB, lo que da como resultado granos con tonalidades más amarillentas y menor atractivo visual (Bedoya-Toro *et al.*, 2023; Córdova-Restrepo *et al.*, 2023; Kifle *et al.*, 2023). Este cambio puede afectar la percepción de calidad

en cafés especiales, ya que los atributos visuales son clave en la clasificación comercial del grano.

En el caso de  $b^*$ , esta coordenada cromática varía desde valores positivos ( $+b^*$ ), que indican tonalidades amarillas, hasta negativos ( $-b^*$ ), que representan tonalidades azules. Al igual que  $a^*$ , los valores de  $b^*$  pueden oscilar entre +60 y -60 (Boscarol, 2007). En las muestras de café verde molido evaluadas, se observaron colores predominantemente verdes ligeramente amarillos con tonalidades claras, reflejadas en valores de  $b^*$  cercanos a cero, que oscilaron entre 0,27 a 6,99. Aunque positivos, estos valores tan próximos a uno indican colores oscuros y baja saturación. De manera similar a la coordenada  $a^*$ , estos valores cromáticos son indicadores importantes para caracterizar la calidad visual del café verde, la cual puede estar influenciada por factores como la variedad, el método de procesamiento y las condiciones de almacenamiento (Bicho *et al.*, 2011; Anokye-Bempah *et al.*, 2021).

#### **7.1.10.3 Color $c^*$ y $h$**

En la presente investigación, los resultados de actividad antioxidante mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $24,82 \pm 0,73$  a  $27,49 \pm 0,67$  como se observa en el Cuadro 2, el beneficio natural presentó la mayor coordenada  $b^*$  ( $27,49 \pm 0,67$ ), seguido por el beneficio lavado ( $25,38 \pm 0,34$ ), y el menor valor se observó en el beneficio *honey* ( $24,82 \pm 0,73$ ). Tan *et al.* (2024) reportan valores de 11 a 13 para granos de *Coffea arabica* L. en verde, lo que indica

colores moderadamente saturados, asociados con buena frescura y calidad sensorial. Asimismo, mencionan que un color más intenso y saturado en café verde puede reflejar un buen desarrollo de pigmentos naturales, un procesamiento cuidadoso y un almacenamiento adecuado. Por el contrario, valores más bajos indican colores apagados o desaturados, lo que podría reflejar oxidación, granos menos frescos o mal procesados, así como inicio de deterioro o sobremaduración. En la Figura 5, puede verse en su componente  $c^*$  las diferentes muestras de dicha variable para las moliendas de café en verde. Iniciando con valores de 24,22 a 27,49 para *Coffea arabica* L., variedad Caturra.

La saturación o pureza, descritas por los valores  $c^*$  (croma) y  $h$  (tono o hue), describen el grado o la intensidad con la que un color se separa del gris neutro y se acerca a un color puro del espectro. Lo cual, describe la reflexión o transmisión de una determinada longitud de onda y es considerado el atributo cuantitativo de la cromacidad (Burambekova, 2024). El croma va de 0 a 100 y el hue ( $h$ ) de 0 a 360°. El valor de  $h$  es el ángulo del tono y se expresa en grados. Directamente los valores de  $c^*$  y  $h$  pueden obtenerse de  $a^*$  y  $b^*$ , de la siguiente manera:  $C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$  y  $h^\circ = \arctan\left(\frac{a^*}{b^*}\right)$  (Burambekova, 2024).

Para el parámetro  $h^\circ$  (tono), el rango de valores obtenido en esta investigación para los seis tratamientos de café verde molido fue de 24,22 a 27,49. De acuerdo con la clasificación del ángulo de tono en el sistema CIELAB, estos valores corresponden a tonalidades ubicadas en la región rojiza–amarilla, asociadas comúnmente con

matices rosados a anaranjados en el café verde. En el cuadro 1 se muestran los valores de tonalidad correspondientes a los distintos ángulos de matiz o tono en las muestras de café molido. Tan *et al.* (2024) reportaron que cafés verdes de *Coffea arabica* L. presentaron valores de  $h^\circ$  en torno a  $100\text{--}110^\circ$ , lo que indica una tonalidad verde-amarilla, asociada con frescura y calidad aceptable. Valores más elevados ( $> 120^\circ$ ) pueden sugerir tonalidades amarillentas más marcadas, las cuales se han relacionado con granos sobremaduros o parcialmente oxidados.

#### **7.1.10.4 Color de L\***

En la presente investigación, los resultados de actividad antioxidante mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $65,73 \pm 0,69$  a  $71,01 \pm 0,26$  como se observa en el Cuadro 2, el beneficio *honey* presentó la mayor coordenada L\* ( $71,01 \pm 0,26$ ), seguido por el beneficio lavado ( $69,76 \pm 1,17$ ), y el menor valor se observó en el beneficio natural ( $65,73 \pm 0,69$ ). En la Figura 5, puede verse en su componente L\* las diferentes concentraciones para las muestras de café molido en verde. Iniciando con valores  $65,73$  a  $71,01$  de cada tratamiento. González *et al.* (2024) y colaboradores reportan valores de L\*  $44$  a  $46$  en café verde de *Coffea arabica* L., como promedio de buena calidad, bien maduros y procesados adecuadamente. Adicionando que valores de L\* por encima de ( $> 50$ ) indican claridad del grano, buena conservación de pigmentos, madurez uniforme y menor riesgo de defectos y valores menores ( $< 40$ ) son indicadores de granos más oscuros, con posible sobremaduración, oxidación o defectos físicos asociados a pérdida de frescura o calidad sensorial reducida.

La luminosidad o brillo, representada por el parámetro  $L^*$  en el espacio de color CIELAB, permite clasificar un color como claro u oscuro. Este atributo describe la percepción visual de un color en comparación con una escala de grises, donde el valor  $L^*$  varía de 0 (negro) a 100 (blanco), según la cantidad de luz reflejada por una superficie (Billmeyer *et al.*, 2017). A diferencia del tono ( $h^\circ$ ) y la saturación ( $C^*$ ), el valor  $L^*$  no forma parte de la cromaticidad, ya que se limita a describir la luminancia percibida, es decir, cuánta luz es reflejada respecto a la absorbida por un objeto ( $v$ ). Esta medida se basa en una transformación no lineal de la luminancia relativa ( $Y/Y_n$ ), lo que refleja la respuesta no lineal del ojo humano a los cambios en la intensidad luminosa (Billmeyer *et al.*, 2017).

Para el caso de esta investigación los valores de  $L^*$  indicaron que en las muestras de café molido se encontraron en valores reflejando una claridad media alta que es de valores 65,73 a 71,01. Por tanto, se sugiere considerar el valor de luminosidad ( $L^*$ ) como un parámetro relevante en la caracterización del café verde molido, ya que proporciona información objetiva sobre su apariencia visual. Este valor permite identificar diferencias en el color asociado al estado de maduración, procesos de secado o posibles defectos físicos.

Una distribución uniforme del color en el café verde es el resultado de un secado adecuado con niveles de humedad de 10 a 12 % para un almacenamiento seguro; cuando el grano de café en pergamino contiene una humedad superior al 12.5 %, el pergamino presenta manchas y se torna pálido y decolorado debido a la migración de agua hacia la superficie del grano (Puerta, 2011).

### **7.2.1 Resultados y discusión en café tostado**

Los resultados que se presentan en los Cuadros 3 y 4 corresponden a los análisis realizados a los tratamientos, por tipo de beneficio y tipo de mineral, así como la interacción entre los mismos, y tiene que ver con las variables respuesta como, fenoles totales mg EAG/ml<sup>-1</sup>, saponinas mg g<sup>-1</sup>, fenoles mg g<sup>-1</sup>, actividad de agua ( $a_w$ ), azúcares reductores g/L y antioxidantes  $\mu\text{mol Trolox/g}$ . a los que se les aplicó un ANOVA ( $P \leq 0,05$ ) y cuando existieron diferencias significativas una prueba de comparación de medias de LSD ( $P \leq 0,05$ ). A continuación, se realiza la discusión de los resultados de las variables indicadas.

Cuadro 3 Resultados de los análisis en café tostado (Fenoles totales, saponinas, fenoles, aw, azúcares reductores y antioxidantes) realizados a los tratamientos.

TRATAMIENTOS	Actividad de agua $a_w$	Fenoles Totales mg EAG/ml <sup>-1</sup>	Fenoles mg g <sup>-1</sup>	Saponinas mg g <sup>-1</sup>	Azúcares Reductores g/L	Antioxidantes μmol Trolox/g
	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$
<b>HONEY</b>	0,25±0,025c	36,90±1,12d	24,45±3,45b	57,23±2,42d	7,39±0,52c	6910,17±25,90b
<b>LAVADO</b>	0,24±0,028d	37,39±1,71d	20,78±178c	58,05±6,62c	6,98±0,62d	6705,67±20,02c
<b>NATURAL</b>	0,32±0,008a	43,25±2,85a	27,37±2,18a	68,43±4,75a	7,88±0,52b	7424,67±33,05a
<b>NO ZEOLITA</b>	0,29±0,032b	38,55±2,05c	26,22±3,44a	65,25±6,03b	6,92±0,44d	7037,00±326,02b
<b>ZEOLITA</b>	0,25±0,049c	39,81±4,61c	22,18±2,56b	57,22±5,57d	7,92±0,35b	6990,00±315,74b
<b>HONEY, NO ZEOLITA</b>	0,27±0,002b	36,42±0,60d	27,60±0,10b	59,17±1,46c	6,93±0,06d	6933,33±7,64b
<b>HONEY, ZEOLITA</b>	0,23±0,007d	37,39±1,43d	21,30±0,26d	55,30±1,13d	7,87±0,02b	6887,00±3,00c
<b>LAVADO, NO ZEOLITA</b>	0,26±0,005c	38,59±1,69c	21,77±0,21d	63,97±1,23b	6,42±0,03e	6723,33±7,64c
<b>LAVADO, ZEOLITA</b>	0,21±0,002e	36,20±0,39d	19,80±0,72e	52,13±1,75e	7,54±0,06c	6688,00±2,64c
<b>NATURAL, NO ZEOLITA</b>	0,33±0,003a	40,66±0,33b	29,30±0,70a	72,63±1,38a	7,41±0,12c	7454,33±9,29a
<b>NATURAL, ZEOLITA</b>	0,32±0,003a	45,84±0,23a	25,43±0,40c	64,23±1,24b	8,34±0,05a	7395,00±2,00a

Los valores son el promedio ( $\bar{X}$ ) y desviación estándar (DS) de triplicados. Los valores de cada columna con diferentes letras (a, b, c, d y e) indican las diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), entre los tratamientos.

Cuadro 4 Resultados de color (L\*, a\*, b\*, c\* y h y pH) a los tratamientos.

TRATAMIENTOS	pH	a*	b*	c*	H	L*
	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$	$\bar{X} \pm DS$
<i>HONEY</i>	5,63±0,010b	12,80±0,35b	20,31±0,659c	33,11±0,989c	0,562±0,007a	21,33±1,12d
LAVADO	5,58±0,022d	12,80±0,16b	20,81±0,646b	33,62±0,526b	0,552±0,019b	22,99±0,90b
NATURAL	5,67±0,031a	12,80±0,31b	21,09±0,401a	33,90±0,532a	0,543±0,012c	24,26±0,55a
NO ZEOLITA	5,64±0,046b	12,64±0,23c	20,74±0,817b	33,37±0,941c	0,547±0,016c	22,96±2,01b
ZEOLITA	5,62±0,040c	12,97±0,19a	20,74±0,450b	33,71±0,501b	0,558±0,013b	22,77±0,81b
<i>HONEY, NO ZEOLITA</i>	5,63±0,015b	12,53±0,23c	19,76±0,378d	32,29±0,583c	0,563±0,006a	20,34±0,28d
<i>HONEY, ZEOLITA</i>	5,63±0,006b	13,07±0,18a	20,85±0,225b	33,93±0,312a	0,560±0,010a	22,32±0,36c
LAVADO, NO ZEOLITA	5,60±0,006c	12,71±0,17c	21,33±0,387a	34,04±0,219a	0,537±0,015d	23,81±0,15a
LAVADO, ZEOLITA	5,57±0,026d	12,90±0,08a	20,30±0,321c	33,20±0,352c	0,567±0,006a	22,18±0,13c
NATURAL, NO ZEOLITA	5,69±0,036a	12,67±0,32c	21,12±0,465a	33,79±0,686b	0,540±0,010c	24,73±0,16a
NATURAL, ZEOLITA	5,65±0,006a	12,93±0,29a	21,07±0,429a	34,00±0,450a	0,547±0,015c	23,80±0,30a

Los valores son el promedio ( $\bar{X}$ ) y desviación estándar (DS) de triplicados. Los valores de cada columna con diferentes letras (a, b, c y d) indican las diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), entre los tratamientos.

### 7.2.1.1 Actividad de agua ( $a_w$ )

#### 7.2.1.2 Beneficio

En la presente investigación los resultados de la actividad de agua ( $a_w$ ), también mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $0,24 \pm 0,028$  a  $0,32 \pm 0,008$  en el Cuadro 3, el mayor valor de ( $a_w$ ) se registró en el beneficio natural ( $0,32 \pm 0,008$ ), seguido por el beneficio *honey* ( $0,25 \pm 0,025$ ), y el menor en el beneficio lavado ( $0,24 \pm 0,028$ ). Estos valores están relacionados a que el tostado implica deshidratación del grano, volatilización del agua retenida, lo que reduce tanto el contenido de humedad como la actividad de agua ( $a_w$ ). Pittia, Nicoli y Sacchetti (2007) estudian cómo la humedad y la actividad de agua influyen en las propiedades texturales del grano, y muestran que el grano tostado tiene menor contenido de agua y que sus propiedades mecánicas dependen de la humectación restante. La curva de sorción del grano tostado indica interacciones agua café, lo cual sugiere cambios en ( $a_w$ ) con la deshidratación.

También, en estudios de café tostado y de procesos de adsorción de humedad, se analiza cómo cambia con el contenido de agua ( $a_w$ ) y cómo eso afecta las reacciones químicas posteriores. Oliveira *et al.* (2017) reportan sobre las propiedades de sorción en café tostado y molido, y concluyen que la reducción del contenido de agua y humedad durante el secado y el tostado disminuye las reacciones de Maillard y la caramelización de azúcares. Estos procesos requieren

agua libre para facilitarse y afectan directamente las transformaciones químicas responsables del color, aroma y sabor característicos del producto final.

La reacción de Maillard, que ocurre entre azúcares reductores y aminoácidos, presenta una actividad óptima en condiciones intermedias de actividad de agua ( $a_w$ ), entre 0,3 a 0,6, en este rango, la movilidad molecular es suficiente para facilitar la interacción entre los reactivos, sin que la dilución excesiva (como ocurre con alta humedad) o la rigidez del medio (como con humedad muy baja) impidan la reacción (Tang *et al.*, 2022). Por tanto, cuando el grano de café se deshidrata en exceso, como en las etapas finales del tostado, la reducción de  $a_w$  puede limitar la velocidad y la extensión de esta reacción, afectando el desarrollo de pigmentos oscuros (melanoidinas) y compuestos volátiles deseables (Abreu *et al.*, 2025).

Por otro lado, la caramelización, que consiste en la degradación térmica de azúcares simples, también se ve influenciada por el contenido de agua. Aunque este proceso no requiere aminoácidos y puede ocurrir en condiciones de baja humedad, una cantidad mínima de agua libre puede actuar como medio de transferencia térmica y facilitar la disolución inicial de los azúcares. Sin embargo, si la humedad es demasiado alta, el exceso de agua puede disipar el calor y reducir la temperatura local, retardando la caramelización. Así, tanto una escasez extrema como un exceso de humedad pueden limitar esta reacción, alterando los perfiles de sabor que se desarrollan durante el tostado (Abreu *et al.*, 2025).

### 7.2.1.3 Interacción

En el presente estudio, el rango de valores para café verde fue de  $0,47 \pm 0,002$  a  $0,55 \pm 0,002$ , mientras que para el café tostado fue de  $0,21 \pm 0,002$  a  $0,33 \pm 0,003$ . Estos valores se encuentran dentro de un contenido de agua ( $a_w$ ) seguro ( $< 0.6$ ) para evitar la proliferación de microorganismos. Cabe destacar que este rango intermedio (0,3–0,6) es crítico tanto en la reacción de Maillard como en la caramelización, como se mencionó previamente.

La interacción entre el tipo de beneficio y el tratamiento aplicado mostró diferencias significativas en actividad de agua ( $p \leq 0,05$ ). El mayor valor se registró en el beneficio natural sin zeolita ( $0,33 \pm 0,003$ ), seguido por el beneficio natural con zeolita ( $0,32 \pm 0,003$ ), mientras que el menor valor correspondió al beneficio lavado con zeolita ( $0,21 \pm 0,002$ ). Riaño (2013), reporta valores similares a los de la presente investigación con un valor de 0,343 en café tostado *Coffea arabica* L. sin especificar el tipo de beneficio. Además, de mencionar que el control del contenido de humedad y de actividad de agua ( $a_w$ ) durante el secado y tostado es crítico para optimizar las reacciones químicas que dan lugar a la complejidad sensorial del café tostado ya que un equilibrio adecuado permite maximizar el desarrollo de compuestos aromáticos y de color, mientras que una deshidratación excesiva puede comprometer la calidad del café.

### 7.2.2.1 Fenoles totales (Método Folin-Ciocalteu)

Los fenoles, un grupo de compuestos orgánicos con reconocida capacidad antioxidante, se encuentran en alta concentración en el café sin tostar. Dentro de

estos, los ácidos clorogénicos destacan por su abundancia y relevancia (Farah & Donangelo, 2006). Sin embargo, durante el proceso de tostado, estos compuestos experimentan transformaciones químicas complejas que afectan tanto su concentración como su funcionalidad antioxidante. Esto repercute directamente en la calidad nutricional y en las propiedades organolépticas del producto final (Apak *et al.*, 2022).

### **7.2.2.2 Beneficio**

En la presente investigación los resultados de fenoles mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $43,25 \pm 2,85$  a  $36,90 \pm 1,12$  mg EAG/ml, tal como se observa en el Cuadro 3, el mayor contenido de fenoles se registró en el beneficio natural ( $43,25 \pm 2,85$  mg EAG/ml), seguido del beneficio lavado ( $37,39 \pm 1,71$  mg EAG/ml), mientras que el valor más bajo se obtuvo en el beneficio *honey* ( $36,90 \pm 1,12$  mg EAG/ml).

La variación de los fenoles en café tostado reportada por Pacheco & Rabottini (2022), presenta valores de  $25,35 \pm 1,02$ ,  $28,43 \pm 0,22$  y  $19,23 \pm 0,76$  mg EAG/g para tostados claros, medios y oscuros, que comparados con los resultados de la presente investigación indican un menor contenido fenólico. El proceso de tostado tiene un impacto significativo sobre la composición fenólica del grano de café, especialmente en los ácidos clorogénicos, que son los principales compuestos antioxidantes presentes en el café verde. Durante el tostado, estos compuestos sufren una degradación térmica considerable, que se acentúa a medida que aumenta la intensidad del tostado. Esta transformación conlleva una disminución

progresiva de la actividad antioxidante en el producto final, siendo más pronunciada en los tostados oscuros (Moon *et al.*, 2009a; Ludwig *et al.*, 2014).

### 7.2.2.3 Interacción

Finalmente, la interacción entre el tipo de beneficio y el tratamiento aplicado mostró diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ). Como se detalla en el Cuadro 3, el mayor contenido de fenoles se registró en el beneficio natural con zeolita ( $45,84 \pm 0,23$  mg EAG/ml), seguido por el método *honey* con zeolita ( $37,39 \pm 1,43$  mg EAG/ml), mientras que la menor concentración se observó en el beneficio lavado con zeolita ( $36,20 \pm 0,39$  mg EAG/ml).

Vega *et al.* (2017) reporta el contenido de fenoles totales de 34 cafés de Panamá de variedades como Typica, Caturra Rojo, Borbón, Mundo Novo, MIDA 96 y Catuai muestras analizadas que oscilan entre 28,60 y 46,82 mg GAE/g y los datos obtenidos en esta investigación demuestran mayor concentración en comparación de algunas variedades como Caturra Rojo (*Coffea arabica* L.). Además, se ha observado que el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante están inversamente correlacionados con el grado de tostado, siendo el café verde el que presenta la mayor capacidad antioxidante (Vignoli *et al.*, 2014). Aunque algunos productos de la reacción de Maillard, como las melanoidinas, pueden aportar cierta actividad antioxidante, estos no compensan completamente la pérdida de los compuestos fenólicos originales (Moreira *et al.*, 2012).

### **7.2.3.1 Fenoles (método separación de solventes)**

Los compuestos fenólicos presentes en el café, como el ácido clorogénico el más abundante en el grano verde, así como sus derivados como los ácidos monoclorogénicos, diclorogénicos, cafeico y gálico, son altamente sensibles al calor. Su degradación comienza a temperaturas moderadas, entre los 108 a 114 °C, y se intensifica considerablemente por encima de los 150-160 °C (Herawati *et al.*, 2019). Por ejemplo, durante procesos de tostado a 220 °C, el contenido de ácido clorogénico puede reducirse drásticamente, pasando de 34,18 mg/g a solo 2,58 mg/g (Zhang *et al.*, 2020). Además, otros compuestos fenólicos como taninos y flavonoides, presentes principalmente en el mucílago y cáscara del grano, también pueden verse afectados negativamente por temperaturas elevadas y tiempos prolongados de exposición (Pujolà *et al.*, 2023). No obstante, a medida que estos compuestos se degradan, se generan productos de la reacción de Maillard, como las melanoidinas, que aportan capacidad antioxidante, color y cuerpo, y pueden compensar parcialmente la pérdida funcional de los compuestos fenólicos originales (Campa *et al.*, 2022).

### **7.2.3.2 Beneficio**

En la presente investigación los resultados de fenoles mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $20,78 \pm 1,78$  a  $27,37 \pm 2,18$  mg g<sup>-1</sup>, tal como se presenta en el Cuadro 3, el mayor contenido de fenoles totales se registró en el beneficio natural ( $27,37 \pm 2,18$  mg g<sup>-1</sup>), seguido por el beneficio *honey* ( $24,45 \pm 3,45$  mg g<sup>-1</sup>), y la menor concentración se observó en el beneficio lavado ( $20,78$

$\pm 1,78 \text{ mg g}^{-1}$ ). Abdulmajid *et al.* (2015), han reportado que el proceso de tostado provoca variaciones en la expresión de las moléculas presentes en el café. Este tipo de investigaciones constituye un valioso aporte tanto para la comunidad científica como para la sociedad en general, ya que, si bien el tostado es un factor determinante en la obtención de un café de calidad, existen también factores postcosecha como la altitud, el tipo de suelo y la genética de la planta que desempeñan un papel fundamental en la calidad del material vegetal, mencionados a detalle anteriormente.

### **7.2.3.3 Interacción**

Finalmente, la interacción entre el tipo de beneficio y el tratamiento aplicado mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0,05$ ). El mayor contenido de fenoles se registró en el beneficio natural sin zeolita ( $29,30 \pm 0,70 \text{ mg g}^{-1}$ ), seguido por el método *honey* sin zeolita ( $27,60 \pm 0,10 \text{ mg g}^{-1}$ ), mientras que la menor concentración se observó en el beneficio lavado con zeolita ( $19,80 \pm 0,72 \text{ mg g}^{-1}$ ). El rango de resultados en café verde siendo de  $21,10 \pm 0,26$  a  $43,40 \pm 0,36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  y finalizando en  $19,80 \pm 0,72$  a  $29,30 \pm 0,70$  refleja que, en este aspecto al no estar sometidos a procesos térmicos como el tostado, los granos de café verde conservan su integridad química, evitando la degradación térmica de compuestos fenólicos sensibles. Estudios han demostrado que el contenido de ácido clorogénico y la capacidad antioxidante se reducen significativamente tras el tostado (Moon *et al.*, 2009b; Liang & Kitts, 2014), por lo que el café verde conserva un mayor potencial antioxidante. Por estas razones, los extractos de café verde han sido ampliamente estudiados no solo por su perfil antioxidante, sino también por su potencial

antidiabético, antihipertensivo y hepatoprotector, atribuidos en gran parte a la sinergia entre sus polifenoles y alcaloides (Naveed *et al.*, 2018).

#### **7.2.4.1 Saponinas**

Las saponinas no son los compuestos más estudiados en el café, se ha documentado que diversos compuestos bioactivos presentes en los granos, como los ácidos clorogénicos y ciertos polifenoles, sufren transformaciones significativas durante el proceso de tostado. Estas transformaciones pueden tener implicaciones en las propiedades sensoriales y en el potencial antioxidante del producto final (Gallardo-Ignacio *et al.*, 2023; Belay & Gholap, 2009).

#### **7.2.4.2 Beneficio**

En la presente investigación los resultados de fenoles mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $57,23 \pm 2,42$  a  $68,43 \pm 4,75 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ , como se muestra en el Cuadro 3, el mayor contenido se registró en el beneficio natural ( $68,43 \pm 4,75 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), seguido por el beneficio lavado ( $58,05 \pm 6,62 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ), mientras que el valor más bajo se observó en el beneficio *honey* ( $57,23 \pm 2,42 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ).

Durante el proceso de tostado, el calor induce reacciones químicas que afectan la composición del grano. Se ha demostrado que la exposición prolongada a altas temperaturas provoca la degradación parcial de compuestos fenólicos, y puede dar lugar a la formación de nuevos compuestos con diferentes propiedades bioactivas,

a través de reacciones como la de Maillard (Pérez-Martínez *et al.*, 2024; Ribeiro *et al.*, 2021).

En términos de capacidad antioxidante, se ha encontrado que el café verde suele presentar una mayor concentración de ciertos compuestos antioxidantes, los cuales disminuyen a medida que se incrementa la temperatura del tostado. Sin embargo, algunos productos derivados del tostado también presentan actividad antioxidante, lo que puede mantener o incluso aumentar el poder antioxidante dependiendo del grado de tostado y del origen del grano (Petti *et al.*, 2015; Tolessa *et al.*, 2021).

#### **7.2.4.3 Interacción**

Los resultados también evidenciaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0,05$ ) en la interacción entre el tipo de beneficio y el tratamiento aplicado. Según el Cuadro 3, el mayor contenido de saponinas se registró en el beneficio natural sin adición de zeolita ( $72,63 \pm 1,38 \text{ mg g}^{-1}$ ), seguido por el beneficio natural con zeolita ( $64,23 \pm 1,24 \text{ mg g}^{-1}$ ). En contraste, la menor concentración se observó en el beneficio lavado con zeolita ( $52,13 \pm 1,75 \text{ mg g}^{-1}$ ). El rango de resultados en café verde siendo de  $189,10 \pm 1,13$  a  $238,23 \pm 0,86 \text{ mg g}^{-1}$  y finalizando en  $52,13 \pm 1,75$  a  $72,63 \pm 1,38 \text{ mg g}^{-1}$ .

De acuerdo con Guzmán *et al.* (2013), para la determinación y cuantificación de saponinas se emplean diversas metodologías analíticas, tales como el método de espuma, que reportó concentraciones entre 7,5 y 21,5  $\text{mg g}^{-1}$  en muestras de cañihua. Por otro lado, mediante espectrofotometría UV/VIS, los valores oscilaron entre 8,7 y 43,2  $\text{mg g}^{-1}$ , evidenciando variaciones según la técnica utilizada.

Además, se analizaron otras muestras como quinua desgrasada y quentu, siendo esta última la que presentó una concentración considerable de saponinas (121,6 mg g<sup>-1</sup>). Estas diferencias metodológicas subrayan la importancia de estandarizar las técnicas analíticas para garantizar la confiabilidad de los resultados.

#### **7.2.5.1 Azúcares reductores**

Estos compuestos no solo aportan a la dulzura natural del café, sino que también participan activamente en reacciones térmicas fundamentales como la caramelización y la reacción de Maillard. Esta última es una serie de reacciones no enzimáticas entre azúcares reductores y aminoácidos que generan numerosos compuestos aromáticos responsables de notas características como nuez, malteadas y especiadas, además del color marrón distintivo del café tostado (Bekele & Emire, 2022).

#### **7.2.5.2 Beneficio**

En la presente investigación los resultados de fenoles mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $6,98 \pm 0,62$  a  $7,88 \pm 0,52$  g/L, tal como se observa en el Cuadro 3, el mayor contenido de azúcares reductores se registró en el beneficio natural ( $7,88 \pm 0,52$  g/L), seguido por el beneficio *honey* ( $7,39 \pm 0,52$  g/L), y la menor concentración se observó en el beneficio lavado ( $6,98 \pm 0,62$  g/L). Estos resultados están asociados a que, durante el proceso de tostado, los azúcares reductores presentes en el café verde se reducen progresivamente (Liang & Kitts, 2018). A temperaturas elevadas, generalmente alrededor de los 170 °C, los azúcares reductores sufren caramelización, lo que produce sabores dulces,

tostados y complejos. Conforme aumenta el grado de tostado, la concentración de azúcares reductores disminuye de manera significativa. En tostados ligeros o medios, una mayor proporción de estos azúcares permanece intacta, favoreciendo perfiles sensoriales con mayor dulzura y notas suaves. En cambio, en tostados oscuros, la degradación de estos compuestos es mayor, lo que reduce la dulzura directa y promueve la formación de melanoidinas, las cuales aportan amargor y sabores intensos característicos de un café fuertemente tostado (Baggenstoss *et al.*, 2008; Farah, 2012).

### **7.2.5.3 Interacción**

Finalmente, la interacción entre tipo de beneficio y tratamiento mostró diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ). El mayor contenido de azúcares reductores se registró en el beneficio natural con zeolita ( $8,34 \pm 0,05$  g/L), seguido por el método *honey* con zeolita ( $7,87 \pm 0,02$  g/L), mientras que la menor concentración se observó en el beneficio lavado sin zeolita ( $6,42 \pm 0,03$  g/L). El rango de resultados en café verde siendo de  $7,40 \pm 0,10$  a  $9,43 \pm 0,30$  g/L y finalizando en  $6,42 \pm 0,03$  a  $8,34 \pm 0,05$  g/L.

### **7.2.6.1 Antioxidantes**

En la presente investigación los resultados de fenoles mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $6706,67 \pm 20,02$  a  $7424,67 \pm 33,05$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ , tal como se observa en el Cuadro 3, el mayor contenido de antioxidantes se registró en el beneficio natural ( $7424,67 \pm 33,05$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ ), seguido por el beneficio *honey* ( $6910,17 \pm 25,90$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ ), y la menor concentración en el beneficio lavado ( $6706,67 \pm 20,02$   $\mu\text{mol Trolox/g}$ ).

Los resultados resaltan que, durante el proceso de tostado, que generalmente se lleva a cabo entre 180 a 240 °C, los compuestos antioxidantes presentes en el café experimentan transformaciones significativas. Los ácidos clorogénicos, que constituyen uno de los antioxidantes más abundantes en el café verde, se descomponen parcialmente y dan lugar a productos derivados de la reacción de Maillard, contribuyendo al desarrollo del color, aroma y sabor característicos del café tostado. Simultáneamente, los polifenoles sufren modificaciones estructurales; algunos se estabilizan o se transforman en nuevos compuestos antioxidantes, como las melanoidinas, mientras que la mayoría pierde su eficacia antioxidante debido a la descomposición térmica (Farah *et al.*, 2005; Moon & Shibamoto, 2009a).

#### **7.2.6.2 Interacción**

Finalmente, la interacción entre tipo de beneficio y tratamiento también mostró diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ). El mayor contenido antioxidante se observó en el beneficio natural sin zeolita ( $7454,33 \pm 9,29 \mu\text{mol Trolox/g}$ ), seguido por el beneficio natural con zeolita ( $7395,00 \pm 2,00 \mu\text{mol Trolox/g}$ ), mientras que el menor contenido correspondió al beneficio lavado con zeolita ( $6688,00 \pm 2,64 \mu\text{mol Trolox/g}$ ), evidenciando la influencia del proceso y del uso de zeolita en la retención de compuestos bioactivos. El rango de resultados en café verde siendo de  $8440,00 \pm 25,00$  a  $9423,33 \pm 10,41 \mu\text{mol Trolox/g}$  y finalizando en  $6688,00 \pm 2,64$  a  $7454,33 \pm 9,29 \mu\text{mol Trolox/g}$ .

El grado de tostado influye de manera significativa en la cantidad y calidad de los antioxidantes. En tostados ligeros o medios, se conserva una mayor concentración

de compuestos antioxidantes, especialmente ácidos clorogénicos, debido a una menor exposición al calor. En contraste, en tostados oscuros, la reducción de antioxidantes es considerable debido a la degradación térmica prolongada. Por lo tanto, a mayor grado de tostado, la capacidad antioxidante total del café disminuye, aunque persisten compuestos bioactivos derivados de las reacciones térmicas, lo que genera un perfil antioxidante más complejo, pero generalmente inferior al del café verde o ligeramente tostado (Farah *et al.*, 2005).

Gallardo *et al.* (2023) reporta en su estudio capacidades antioxidantes inferiores en granos tostados de las variedades Típica y Bourbon, con valores entre  $14,39 \pm 1,16$  y  $12,15 \pm 0,49$   $\mu\text{mol Trolox/g}$  (ABTS) y entre  $52,74 \pm 4,84$  y  $42,52 \pm 1,91$   $\mu\text{mol Trolox/g}$  (DPPH), lo que resalta la importancia del método de procesamiento, variedad y técnicas analíticas empleadas.

#### **7.2.7.1 pH**

El pH del café tostado es un factor clave que influye en las características sensoriales del producto final. Durante el proceso de tostado, las propiedades químicas del grano experimentan cambios significativos, afectando tanto el sabor como la acidez del café (Rao & Fuller, 2018).

#### **7.2.7.2 Beneficio**

En la presente investigación los resultados de fenoles mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $5,58 \pm 0,022$  a  $5,67 \pm 0,031$ , tal como se observa en el Cuadro 4, el mayor valor de pH se registró en el beneficio natural

(5,67 ± 0,031), seguido por el beneficio *honey* (5,63 ± 0,01), y la menor concentración se observó en el beneficio lavado (5,58 ± 0,022). La diferencia en pH en café verde y café tostado es que suele al pasar por un proceso de temperatura el grano ser más ácido, situándose generalmente en un rango de 4,8 a 5,5, aunque este valor puede variar dependiendo del tipo de grano, el método de procesamiento y el grado de tostado (Farah, 2012).

Las reacciones de Maillard y la caramelización de azúcares, fundamentales durante el tostado, influyen en la modificación del pH del café. Estas reacciones producen compuestos que afectan la acidez y enriquecen el perfil sensorial, generando sabores complejos y notas suaves que equilibran la acidez inicial del grano. Asimismo, la descomposición de compuestos fenólicos, como los ácidos clorogénicos, contribuye a la disminución del pH, impactando la percepción tanto de la acidez como del amargor en la bebida final (Almeida *et al.*, 2021; Farah & Donangelo, 2006).

### **7.2.7.3 Interacción**

Finalmente, la interacción entre el tipo de beneficio y el tratamiento aplicado también mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0,05$ ). El valor de pH más alto se registró en el café procesado mediante beneficio natural sin zeolita (5,69 ± 0,036), seguido por el beneficio natural con zeolita (5,65 ± 0,006). Por el contrario, el valor más bajo se observó en el beneficio lavado con zeolita (5,57 ± 0,026). Estos resultados sugieren que tanto el método de beneficio como la adición de zeolita influyen en la acidez iónica del grano, posiblemente debido a variaciones en la retención de compuestos orgánicos ácidos durante el procesamiento. En relación

con la normativa de calidad, se observó que el 92 % de las muestras analizadas presentaron valores de pH dentro del rango adecuado para la acidez iónica del café, establecido entre 4,7 a 5,4, según la Norma Mexicana NMX-F-139-SCFI-2010, que define parámetros aceptables de calidad en productos de café. No obstante, algunos valores superaron ligeramente este intervalo, lo que podría asociarse a factores como variedad, grado de madurez del grano, secado y fermentación.

Oblitas *et al.* (2014) señalan que el pH del café está estrechamente relacionado con la acidez percibida en taza, considerando óptimo un rango entre 4,9 a 5,2 para una buena calidad sensorial. Por tanto, las variaciones observadas en este estudio podrían tener implicaciones en la percepción organoléptica, particularmente en atributos como la acidez brillante o la suavidad en boca.

#### **7.2.8.1 Resultados de color**

El color de los granos de café tostado es un indicador crítico del nivel de tueste, y a su vez refleja la calidad del proceso y del producto final. Aunque los perfiles de tueste pueden variar ampliamente, los valores medidos en el espacio de color CIELAB ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) siguen una “curva universal”, lo que sugiere que el desarrollo del color durante el tueste está fuertemente ligado a las transformaciones químicas internas (reacciones de Maillard y procesos de oxidación térmica) (Anokye-Bempah *et al.*, 2025).

En el círculo cromático (Figura 6) se muestran los seis puntos que corresponden a las interacciones asociadas con las muestras de café molido tostado provenientes de los diferentes métodos de beneficio.

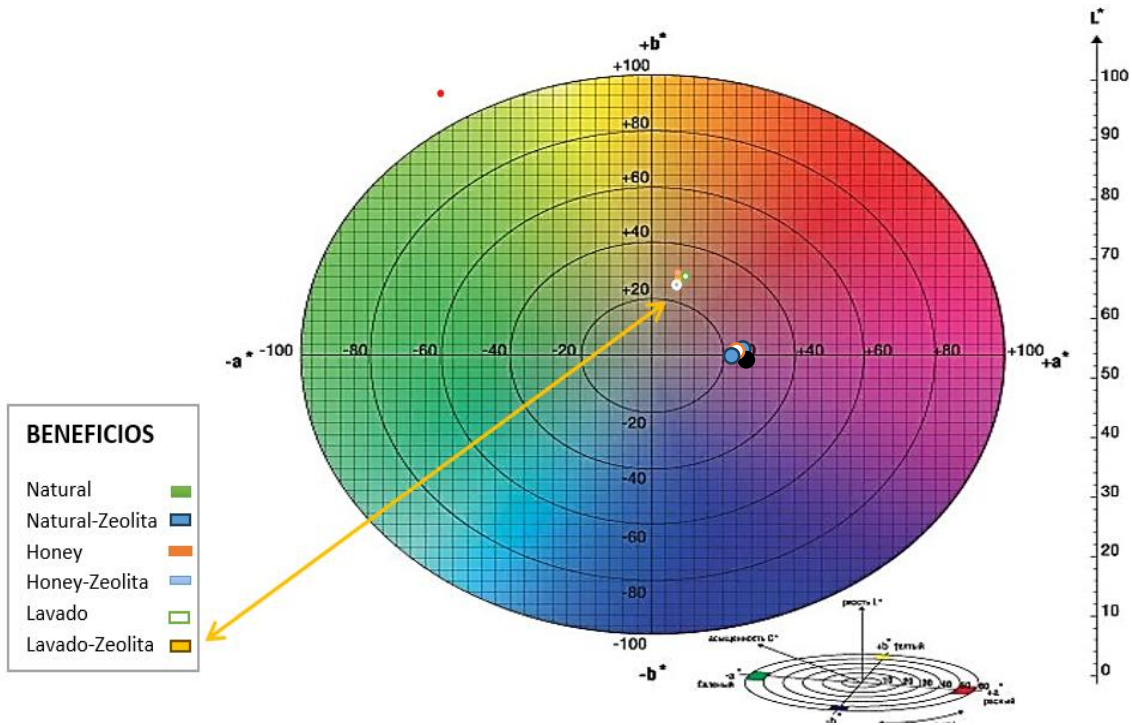


Figura 6. Círculo cromático, para presentar las muestras de café molido verde y café tostado.

En la Figura 6, se observan las coordenadas de color de los componentes  $a^*$  y  $b^*$  de las interacciones de las muestras en café molido tostado. Los puntos indican los valores de cada muestra de café tostado con valor de 12,53 en  $a^*$  y 19,76 en  $b^*$  que dan tonalidades verdes a ligeramente rojizas, los valores máximos son de 12,53 a 21,33 acercándose a tonos rojos. Al igual que en los otros puntos, se muestran las diferentes muestras de acuerdo con el tipo de beneficio.

### 7.2.8.2 Color a\*

En la presente investigación, los resultados de actividad antioxidante mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es  $12,71 \pm 0,17$  a  $13,07 \pm 0,18$  como se observa en el Cuadro 4, la mayor coordenada a\* se registró en el beneficio *honey* ( $13,07 \pm 0,18$ ), seguido por el beneficio natural ( $12,90 \pm 0,08$ ), mientras que el menor valor se observó en el beneficio lavado ( $12,71 \pm 0,17$ ).

En la Figura 6, puede verse en el componente a\* de color las diferentes muestras de dicha variable para las moliendas de café. Los valores encontrados fueron de 12,53 a 13,07 para *Coffea arabica* L., variedad Caturra.

Recientemente, Anokye-Bempah *et al.* (2025) demostraron que, independientemente del perfil de tueste (rápido, lento o medio) o del origen geográfico, los granos de *Coffea arabica* L. siguen una curva de color universal en espacios L\*, a\* y b\*. Esta trayectoria es consistente en estadios clave del tostado como el cambio de color.

El color del café tostado molido es una característica visual clave que refleja los cambios fisicoquímicos inducidos durante el proceso de tueste. Este color puede cuantificarse de manera objetiva mediante el sistema colorimétrico CIELAB (L\*, a\*, b\*), donde L\* representa la luminosidad, a\* el eje rojo-verde, y b\* el eje amarillo-azul (Silva *et al.*, 2022). Durante el tueste, los valores de L\* tienden a disminuir (indicando un oscurecimiento), mientras que a\* y b\* experimentan variaciones según la formación de compuestos de pardeamiento (Aluigi *et al.*, 2023).

En el caso de  $a^*$  es una coordenada cromática que va de  $+a^*$  (positivo) que indica rojo y hasta,  $a^*$  (negativo) que indica verde. Los valores máximos para obtener son 60 positivo, pasando por 0, hasta 60 negativo, que sería verde. Como era de esperarse, las muestras de café y en especial estas, presentaron tonalidades oscuras, pues estuvieron cercanos a 12. Desde 12.53 a 13.07 en rojos.

### **7.2.8.3 Color $b^*$**

En la presente investigación, los resultados de actividad antioxidante mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $19,76 \pm 0,378$  a como  $21,33 \pm 0,387$  se observa en el Cuadro 4, el beneficio lavado presentó la mayor coordenada  $b^*$  ( $21,33 \pm 0,387$ ), seguido por el beneficio natural ( $21,12 \pm 0,465$ ), y el menor valor se observó en el beneficio *honey* ( $19,76 \pm 0,378$ ).

En la Figura 6, puede verse en su componente  $b^*$  las diferentes muestras de dicha variable para las moliendas de café tostado. Iniciando con valores de 19,76 a 21,33 para *Coffea arabica* L, variedad Caturra.

Esta variación refleja diferencias en la intensidad de tonos rojizos presentes en los granos tostados, lo cual se asocia con la retención de compuestos como azúcares. Este cambio puede afectar la percepción de calidad en cafés especiales, ya que los atributos visuales son clave en la clasificación comercial del grano (Bedoya-Toro *et al.*, 2023; Córdova-Restrepo *et al.*, 2023; Kifle *et al.*, 2023).

En las muestras de café tostado molido evaluadas, se observaron tonalidades predominantemente rojizas con ligeros matices anaranjados y una apariencia

oscura, características consistentes con valores positivos en las coordenadas cromáticas  $a^*$  y  $b^*$  del espacio de color CIELAB. Los valores de  $b^*$  oscilaron entre 19,76 y 21,33, lo cual indica una presencia moderada de componentes amarillos en el color del café, sin llegar a una alta saturación. Aunque estos valores reflejan cierta intensidad cromática, la baja luminosidad propia del café tostado contribuye a una percepción visual oscura.

De manera similar a la coordenada  $a^*$  (que indica la componente roja), el valor de  $b^*$  es un parámetro relevante para la caracterización visual del café tostado, ya que puede estar influenciado por diversos factores como la variedad de café, el método de beneficio, el perfil de tueste, y las condiciones de almacenamiento (Gloess *et al.*, 2013; Ribeiro *et al.*, 2014).

#### **7.2.8.4 Color $c^*$ y $h$**

En la presente investigación, los resultados de actividad antioxidante mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $33,20 \pm 0,352$  a  $34,04 \pm 0,219$  como se observa en el Cuadro 4, el beneficio lavado presentó la mayor coordenada  $c^*$  ( $34,04 \pm 0,219$ ), seguido por el beneficio natural ( $33,79 \pm 0,686$ ), y el menor valor se observó en el beneficio lavado ( $33,20 \pm 0,352$ ).

En la Figura 6, puede verse en su componente  $c^*$  las diferentes muestras de dicha variable para las moliendas de café en verde. Iniciando con valores de 32,29 a 34,04 para *Coffea arabica* L, variedad Caturra.

En el caso del ángulo de matiz (hue) los valores obtenidos para las muestras oscilaron entre 0,540 y 0,567. Este intervalo sugiere una predominancia de

tonalidades anaranjadas-rojizas, típicas de cafés tostados con intensidades media a alta (Bicho *et al.*, 2012). Estos valores, al estar ubicados dentro del primer cuadrante del círculo cromático CIELAB, reflejan una coloración cálida con baja saturación, atribuible a la formación de pigmentos como melanoidinas durante el proceso de tostado (Ribeiro *et al.*, 2014).

En el Cuadro 4 se presentan los valores específicos del ángulo de matiz correspondientes a cada uno de los seis tratamientos evaluados, permitiendo observar la influencia del método de beneficio sobre la coloración final del café molido.

#### **7.2.8.5 Color de L\***

En la presente investigación, los resultados de actividad antioxidante mostraron diferencias significativas estadísticamente ( $p \leq 0,05$ ) entre los distintos métodos de beneficio. El rango de valores obtenido para esta variable es de  $21,33 \pm 1,12$  a  $24,26 \pm 0,55$  como se observa en el Cuadro 4, el beneficio natural presentó la mayor coordenada L\* ( $24,26 \pm 0,55$ ), seguido por el beneficio lavado ( $22,99 \pm 0,90$ ), y el menor valor se observó en el beneficio *honey* ( $21,33 \pm 1,12$ ).

En la Figura 6, puede verse en su componente L\* las diferentes concentraciones para las muestras de café tostado. Iniciando con valores 20,34 a 24,73 de cada tratamiento. La coordenada L\* es el principal indicador del grado de tostado. Valores altos de L\* corresponden a tostados claros, mientras que valores bajos indican tostados más oscuros (Ribeiro *et al.*, 2014).

En esta investigación, los valores de luminosidad (L\*) obtenidos en las muestras de café tostado molido oscilaron entre 20,34 y 24,73, lo que indica una claridad media

a baja. Estos resultados son consistentes con los perfiles visuales característicos de cafés con un grado de tueste medio, donde la formación de compuestos como melanoidinas reduce significativamente la reflexión de la luz, lo que oscurece el color del grano y del molido (Gloess *et al.*, 2013).

El valor de luminosidad ( $L^*$ ) es un parámetro fundamental en la caracterización del café tostado molido, ya que ofrece una medida objetiva y cuantificable de su apariencia visual (Silva *et al.*, 2022). Este valor está estrechamente relacionado con el grado de tueste, pues a medida que el café se tuesta más intensamente, la luminosidad disminuye, reflejando una coloración más oscura que influye en la percepción sensorial del producto final (Aluigi *et al.*, 2023). Además, la medición precisa de  $L^*$  permite identificar variaciones en el perfil de color causadas por diferencias en el proceso de tueste o la calidad del grano, lo cual es crucial para asegurar la estandarización y control de calidad en la industria cafetalera (Donis-González *et al.*, 2025). Por tanto, la evaluación del valor  $L^*$  contribuye significativamente a la determinación de la calidad visual del café tostado molido y a la aceptación del consumidor (Yeager *et al.*, 2022).

### **7.3.1. Resultados y discusión cinética de secado**

Esta sección presenta los resultados obtenidos del análisis de la cinética de secado del café, considerando los tratamientos evaluados en función del tipo de beneficio (natural, honey y lavado) y del uso de zeolita, así como la interacción entre ambos factores. Las variables analizadas fueron la razón de humedad (MR), la velocidad de secado y el tiempo de secado, las cuales permiten describir el comportamiento

del proceso y evaluar el efecto de la zeolita en la transferencia de masa durante el secado. Los datos experimentales fueron analizados mediante ajustes matemáticos de modelos de secado ya que permiten estimar parámetros cinéticos asociados a la difusión de humedad y evaluar la eficiencia del proceso de secado bajo diferentes condiciones experimentales, utilizando el software SigmaPlot, con el fin de obtener las ecuaciones que describen el comportamiento de las curvas y sus parámetros cinéticos.

La calidad del ajuste de los modelos se evaluó con base en los coeficientes de determinación ( $R^2$ ), el error estándar de la estimación y la coherencia del comportamiento de las curvas obtenidas, lo que permitió seleccionar el modelo que mejor describe la cinética de secado en cada tratamiento. A partir de estos resultados, se analizó la influencia del uso de zeolita en la reducción del contenido de humedad y en la velocidad de secado del café, comparando el comportamiento entre los diferentes tipos de beneficio.

#### **7.3.1.1 Análisis de regresión no lineal de la cinética de secado**

Las curvas de cinética de secado de los cafés natural (Fig. 7), honey (Fig. 8) y lavado (Fig. 9), con y sin zeolita, mostraron una disminución exponencial del contenido de humedad, característica de materiales agrícolas (Doymaz, 2011; Onwude et al., 2016). En todos los tratamientos, el proceso se desarrolló en tres etapas, una fase inicial de secado rápido asociada a la eliminación de agua libre, seguida de una etapa de velocidad decreciente controlada por difusión interna, y una fase final cercana al equilibrio donde predomina el agua ligada, en concordancia con lo reportado para granos de *Coffea arabica* (Fernando et al., 2025).

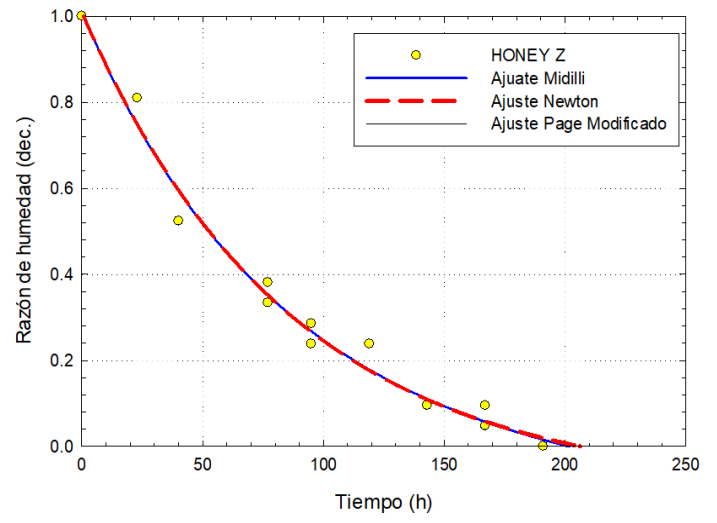
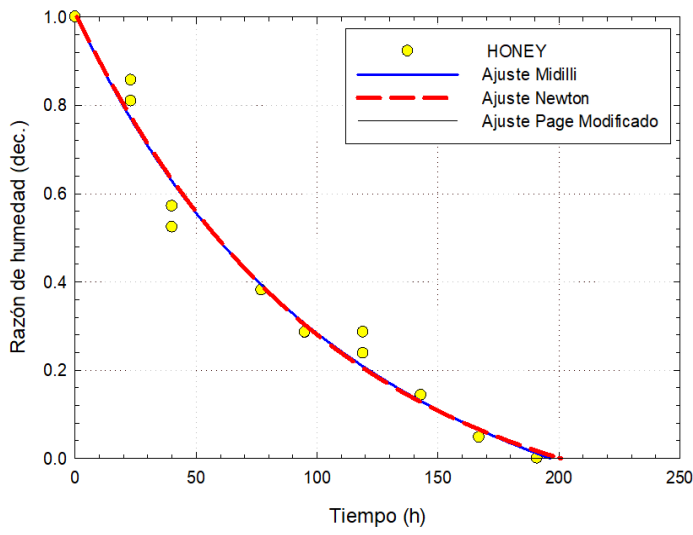


Figura 9 Relación de humedad (MR) en función del tiempo durante el secado de café natural con y sin zeolita, y su modelado mediante las ecuaciones de Midilli, Page modificado y Newton.

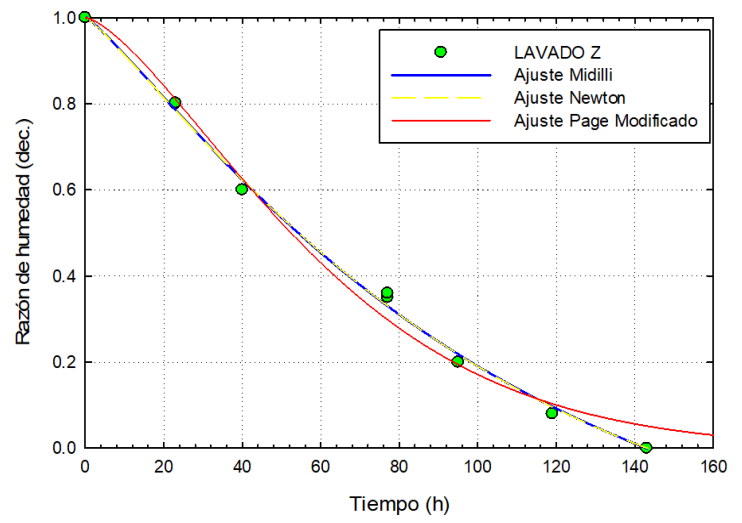
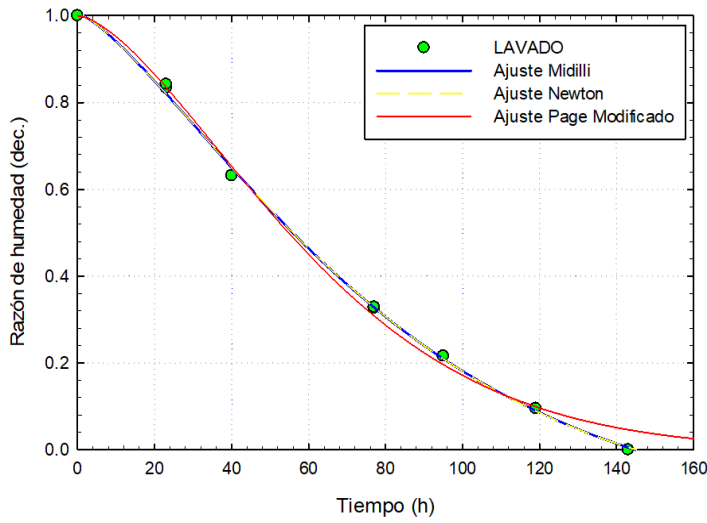


Figura 8 Relación de humedad (MR) en función del tiempo durante el secado de café lavado con y sin zeolita, y su modelado mediante las ecuaciones de Midilli, Page modificado y Newton.

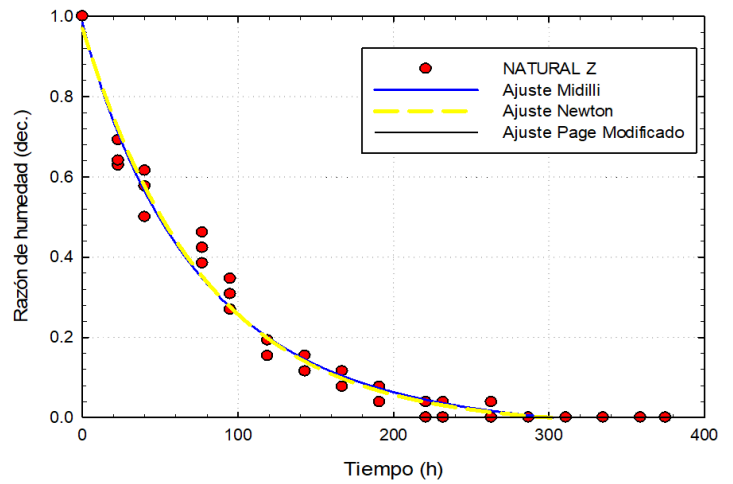
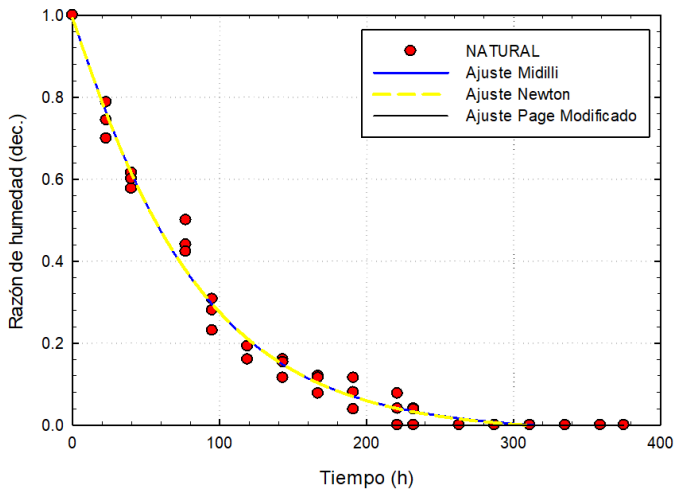


Figura 7 Pendiente de  $\ln(MR)$  en función del tiempo y difusividad efectiva de la humedad ( $Deff$ ) para los procesos de café Natural, Honey y Lavado, con y sin zeolita.

Se observaron diferencias claras en la duración del proceso según el tipo de beneficio. El café natural con zeolita presentó la cinética más lenta, con una fase decreciente extendida siguiendo el modelo de Midilli  $MR = 0.9838e^{-0.0170t^{0.9439}} - 7.7952 \times 10^{-5}t$ , con el mejor ajuste, con un periodo prolongado de velocidad decreciente que se extendió hasta ~220 h y alcanzando el equilibrio entre 350–380 h (Fig. 1), evidenciando mayor resistencia a la transferencia de masa debido a la presencia de mucílago. En contraste, el café honey con zeolita (Fig. 2) mostró un comportamiento intermedio (equilibrio ~190–200 h), siguiendo el modelo de Midilli  $MR = 1.0104e^{0.0128t^{0.9956}} - 0.0004t$ , mientras que el café lavado (Fig. 3) alcanzó el equilibrio más rápidamente (140–160 h), siguiendo el modelo de Midilli  $MR = 1.0049e^{-0.0025^{1.3755}t} - 0.0007t$ , confirmando que la eliminación del mucílago favorece la difusión de humedad, en concordancia con la influencia de la estructura del grano sobre la difusividad efectiva (Andrade *et al.*, 2024; Abreu *et al.*, 2025).

La incorporación de zeolita intensificó el proceso de secado en todos los tratamientos, particularmente en la etapa de velocidad decreciente, al incrementar el gradiente de humedad mediante su capacidad adsorbente (Misaelides, 2011). Este efecto fue más notable en el café natural, donde las limitaciones difusionales son mayores, mientras que en el café lavado su impacto fue menos pronunciado.

Los modelos de Midilli, Newton y Page modificado describieron adecuadamente la cinética en todos los casos ( $R^2 \text{ adj} > 0.99$ ) (Midilli *et al.*, 2002; Erbay & Icier, 2010). Sin zeolita, el modelo de Newton presentó el mejor ajuste, indicando una cinética de tipo exponencial simple; mientras que, en presencia de zeolita, el modelo de

Midilli mostró mayor precisión, especialmente en café natural y honey, reflejando una mayor complejidad en los mecanismos de transferencia de masa (Miano & Rojas, 2024; Andrade *et al.*, 2024). Los resultados evidencian que el tipo de beneficio determina la resistencia estructural al secado, mientras que la zeolita actúa como un intensificador del proceso.

**Tabla 4 Comparación del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  adj) y error estándar de estimación (SEE) de los modelos Midilli, Newton y Page modificado para el secado de café natural con y sin zeolita**

Ecuación	Secado sin zeolita		Secado con zeolita	
	$R^2$ adj	SEE	$R^2$ adj	SEE
<b>Midilli General</b>	0.9947	0.0316	0.9995	0.0363
<b>Newton</b>	0.9948	0.0314	0.9928	0.0357
<b>Page Modificado</b>	0.9944	0.0319	0.9915	0.0380

SEE: error estándar de los estimados,  $R^2$  coeficiente de determinación ajustado.

**Tabla 5 Comparación del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  adj) y error estándar de estimación (SEE) de los modelos Midilli, Newton y Page modificado para el secado de café honey con y sin zeolita**

Ecuación	Secado sin zeolita		Secado con zeolita	
	$R^2$ adj	SEE	$R^2$ adj	SEE
<b>Midilli General</b>	0.9911	0.0470	0.9922	0.0439
<b>Newton</b>	0.9910	0.0475	0.9921	0.0442
<b>Page Modificada</b>	0.9889	0.0505	0.9911	0.0451

SEE: error estándar de los estimados,  $R^2$  coeficiente de determinación ajustado.

**Tabla 6 Comparación del coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$  adj) y error estándar de estimación (SEE) de los modelos Midilli, Newton y Page modificado para el secado de café lavado con y sin zeolita**

SEE: error estándar de los estimados,  $R^2$  coeficiente de determinación ajustado.

<b>Ecuación</b>	<b>Secado sin zeolita</b>		<b>Secado con zeolita</b>	
	<b><math>R^2</math> adj</b>	<b>SEE</b>	<b><math>R^2</math> adj</b>	<b>SEE</b>
<b>Midilli General</b>	0.9995	0.0121	0.9989	0.0181
<b>Newton</b>	0.9995	0.0124	0.9989	0.0181
<b>Page Modificado</b>	0.9981	0.0232	0.9957	0.0342

### 7.3.1.2. Curvas de velocidad de secado (dMR/dt) en función del tiempo para café procesado por los métodos natural, honey y lavado, con y sin zeolita

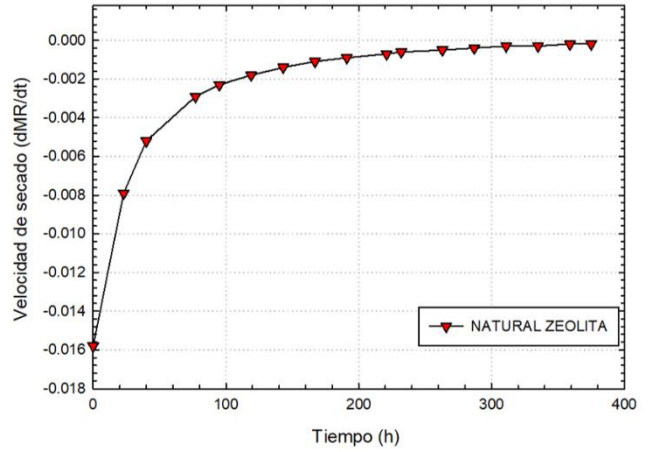
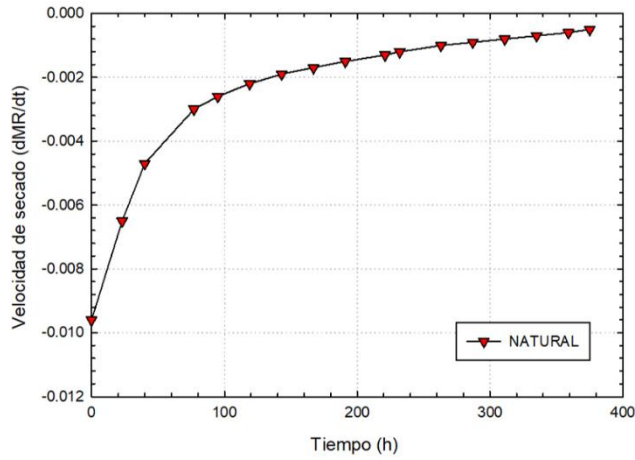


Figura 12 Variación de la velocidad de secado (dMR/dt) con y sin zeolita en función del tiempo, para el secado de café (*Coffea arabica* L.) con beneficio natural

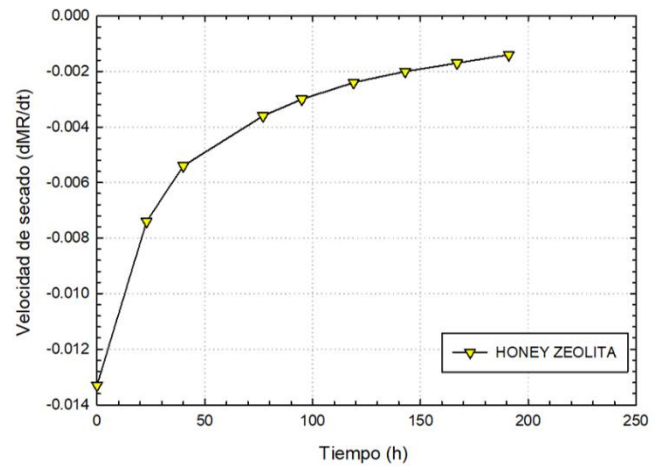
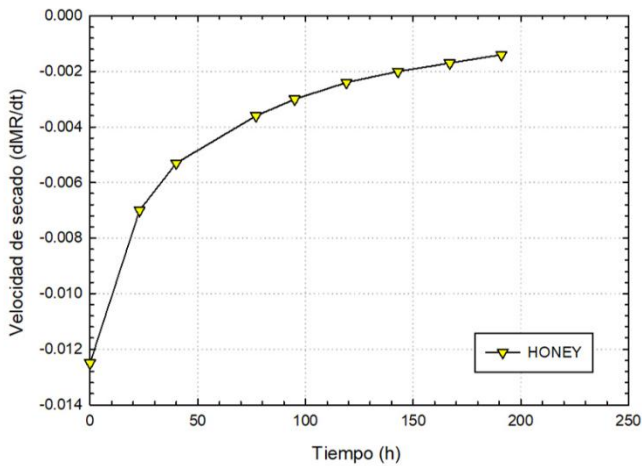


Figura 11 Variación de la velocidad de secado (dMR/dt) con y sin zeolita en función del tiempo, para el secado de café (*Coffea arabica* L.) con beneficio honey

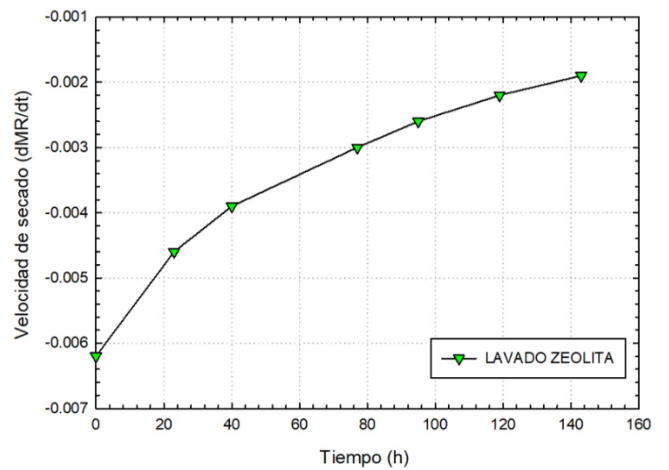
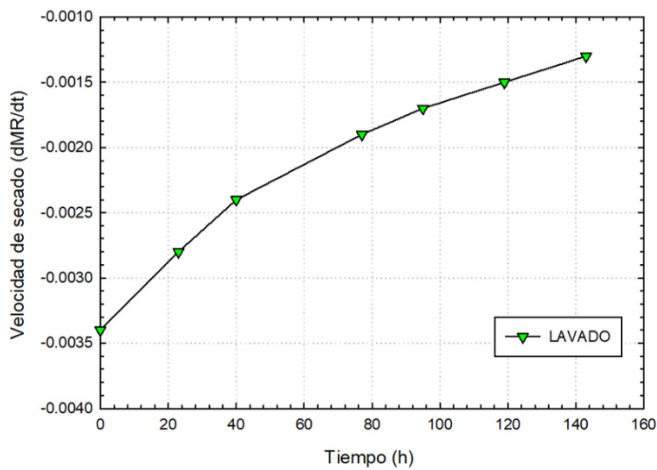


Figura 10 Variación de la velocidad de secado (dMR/dt) con y sin zeolita en función del tiempo, para el secado de café (*Coffea arabica* L.) con beneficio lavado

El análisis comparativo de las curvas de velocidad de secado ( $dMR/dt$ ,  $h^{-1}$ ) en función del tiempo (Figs. 4–6) mostró que la velocidad máxima de secado se alcanzó durante la etapa inicial del proceso ( $t \approx 0-20$  h) para todos los tratamientos, correspondiente a la eliminación del agua libre superficial. Sin embargo, se observaron diferencias claras en la magnitud de esta velocidad máxima de secado dependiendo del método de procesamiento y de la incorporación de zeolita. El café lavado presentó el mejor desempeño cinético, alcanzando las mayores velocidades iniciales de secado en el sistema ( $\approx -0.015$  a  $-0.016$   $h^{-1}$ ), reflejando una menor resistencia global a la transferencia de masa y una rápida eliminación de humedad; en este caso, la adición de zeolita no produjo incrementos significativos, lo que indica que el proceso está principalmente controlado por difusión interna desde etapas tempranas.

En contraste, el café natural mostró las menores velocidades iniciales de secado ( $\approx -0.010$   $h^{-1}$  sin zeolita), evidenciando una mayor resistencia al transporte de humedad asociada con la presencia de mucílago; sin embargo, este tratamiento fue el que más se benefició de la incorporación de zeolita, alcanzando incrementos de hasta 40% en la velocidad máxima de secado ( $\approx -0.014-0.015$   $h^{-1}$ ), lo que sugiere una intensificación efectiva del gradiente de humedad en la superficie del grano. El café procesado por el método honey presentó un comportamiento intermedio, con velocidades iniciales de secado cercanas a  $-0.012$   $h^{-1}$  sin zeolita y  $\approx -0.014$   $h^{-1}$  con zeolita, mostrando una respuesta moderada a la incorporación del material adsorbente. En general, los resultados establecen un orden claro en la eficiencia de secado en términos de velocidad máxima de secado: lavado > honey > natural,

mientras que el efecto de la zeolita siguió una tendencia inversa (natural, honey y lavado), confirmando que su principal contribución es la reducción de la resistencia externa en sistemas con mayores limitaciones difusionales superficiales.

De manera consistente con este comportamiento, el análisis basado en la relación  $\ln(MR)$  en función del tiempo (Tabla 7) permitió la estimación de la difusividad efectiva ( $Deff$ ), proporcionando una descripción global del proceso bajo un enfoque difusional. Los valores obtenidos mostraron que la incorporación de zeolita incrementó la magnitud de la pendiente y, en consecuencia, la difusividad efectiva para todos los tratamientos, aumentando de  $9.5 \times 10^{-9}$  a  $1.44 \times 10^{-8}$   $m^2/s$  para el café natural, de  $1.21 \times 10^{-8}$  a  $1.35 \times 10^{-8}$   $m^2/s$  para el café honey, y de  $5.6 \times 10^{-9}$  a  $8.6 \times 10^{-9}$   $m^2/s$  para el café lavado. Este incremento fue más pronunciado en el café natural, reforzando la interpretación previa de que este sistema presenta mayores limitaciones a la transferencia de humedad que pueden ser parcialmente superadas mediante la acción adsorbente de la zeolita. Así, mientras que el café lavado presenta las mayores velocidades iniciales de secado, el café natural muestra la mayor mejora relativa en términos de transferencia de masa, demostrando que la estructura del grano y el método de procesamiento determinan tanto la cinética instantánea como el comportamiento difusional global del proceso de secado.

**Tabla 7 . Pendiente de  $\ln(MR)$  en función del tiempo y difusividad efectiva de la humedad ( $Deff$ ) para los procesos de café Natural, Honey y Lavado, con y sin zeolita.**

Proceso	Pendiente sin zeolita ( $h^{-1}$ )	$Deff$ sin zeolita ( $m^2/s$ )	Pendiente con zeolita ( $h^{-1}$ )	$Deff$ con zeolita ( $m^2/s$ )
<b>Natural</b>	-0.00765	$9.5 \times 10^{-9}$	-0.0116	$1.44 \times 10^{-8}$
<b>Honey</b>	-0.00974	$1.21 \times 10^{-8}$	-0.01083	$1.35 \times 10^{-8}$

<b>Lavado</b>	-0.00452	$5.6 \times 10^{-9}$	-0.00695	$8.6 \times 10^{-9}$
---------------	----------	----------------------	----------	----------------------

## VIII. CONCLUSIONES

- ❖ Los resultados obtenidos confirman que el tipo de beneficiado y las condiciones de secado influyen de manera significativa en la calidad fisicoquímica y sensorial del café, tanto en su estado verde como después del tostado, lo que evidencia la importancia del control adecuado de estas etapas dentro de la cadena productiva. En particular, el beneficio natural mostró los mejores resultados, tanto en los parámetros físicos y químicos como en la conservación de los compuestos bioactivos.
- ❖ El secado en invernadero, bajo condiciones controladas de temperatura, ventilación y humedad relativa, permitió alcanzar contenidos de humedad adecuados sin comprometer la integridad estructural del grano, contribuyendo a una deshidratación más uniforme y a la preservación de compuestos bioactivos.
- ❖ El estado de maduración del fruto, evaluado a través del contenido de sólidos solubles, se relacionó con la calidad del café obtenido, ya que frutos con mayor concentración de azúcares favorecieron el desarrollo de compuestos aromáticos durante el proceso de tostado.
- ❖ En el café tostado, las variaciones observadas en la composición química y en los atributos sensoriales reflejan la interacción entre el método de procesamiento, las condiciones de secado y el perfil de tostado, destacando la necesidad de considerar estas etapas de manera integral.

- ❖ La evaluación conjunta de parámetros fisicoquímicos y sensoriales permitió una mejor comprensión del impacto del secado sobre la calidad final del café, evidenciando que un manejo adecuado del proceso contribuye a la obtención de un producto con características sensoriales superiores.
- ❖ El uso de zeolita como material adsorbente modificó las condiciones del proceso de secado, influyendo en el comportamiento de la pérdida de humedad del café en comparación con el secado sin zeolita.
- ❖ El análisis de la cinética de secado mostró que la relación de humedad (MR) disminuye en función del tiempo, presentando un comportamiento característico de productos agrícolas, con una mayor velocidad de secado en las primeras etapas y una disminución progresiva conforme el contenido de humedad se aproxima al equilibrio.
- ❖ Los modelos matemáticos de Newton, Page modificado y Midilli describieron adecuadamente el comportamiento experimental del secado, permitiendo estimar los parámetros cinéticos y comparar los tratamientos con y sin zeolita.
- ❖ Los resultados de este estudio aportan información relevante para el diseño y la optimización de procesos de secado y tostado orientados a la mejora de la calidad del café, particularmente en la conservación de compuestos bioactivos y en el desarrollo del perfil sensorial del producto final.

## **IX. RECOMENDACIONES**

- ✓ Se recomienda mantener un control de las condiciones de secado, particularmente de la temperatura, la humedad relativa y la ventilación, con

el fin de evitar velocidades de deshidratación excesivas que puedan generar fisuras en el grano o la degradación de compuestos bioactivos sensibles al calor. El uso de sistemas de secado en invernadero con monitoreo continuo puede contribuir a mejorar la uniformidad del proceso y la calidad final del café.

- ✓ Es recomendable seleccionar frutos con estados de maduración homogéneos, preferentemente con contenidos elevados de sólidos solubles (> 24 °Brix), ya que la uniformidad influye directamente en la calidad sensorial y en el desarrollo de compuestos aromáticos durante el tostado.
- ✓ La elección del método de beneficio (lavado, *honey* o natural) debe realizarse considerando las condiciones climáticas, la infraestructura disponible y el perfil sensorial deseado.
- ✓ Se recomienda establecer perfiles de tostado bien definidos y reproducibles, ya que variaciones en tiempo y temperatura influyen significativamente en la degradación o formación de compuestos bioactivos y en las características sensoriales del café, ya que la estandarización permitiría una mejor comparación entre tratamientos y estudios posteriores.
- ✓ Se sugiere complementar los análisis fisicoquímicos con evaluaciones sensoriales estandarizadas, a fin de correlacionar los cambios en los compuestos bioactivos con la percepción sensorial del café tostado.

## X. BIBLIOGRAFÍA

- Alves, G. E., Isquierdo, E. P., Borém, F. M., & Andrade, E. T. (2013). Drying kinetics of natural coffee for different temperatures and low relative humidity. *Coffee Science*, 8(2), 171–181.
- Arizmendi, D., Gómez, R., Dublán, O., Gómez, V., & Domínguez, A. (2016). Electron paramagnetic resonance study of hydrogen peroxide/ascorbic acid ratio as initiator redox pair in the inulin–gallic acid molecular grafting reaction. *Carbohydrate Polymers*, 136, 350–357. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.09.064>
- Anokye-Bempah, L., Styczynski, T., Ristenpart, W. D., & Donis-González, I. R. (2025). A universal color curve for roasted Arabica coffee. *Scientific Reports*, 15(1), 24192. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06601-w>
- Andrade, P. S., Duarte, C. R., & Barrozo, M. A. S. (2024). An innovative dryer for Arabica coffee drying: Investigating heat and mass transfer. *Drying Technology*, 42(6), 1065–1076. Available from: <https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2341399>
- Abreu, D. J. M., Lorenço, M. S., Machado, G. G. L., Silva, J. M., Azevedo, E. C., & Carvalho, E. E. N. (2025). Influence of drying methods on the post-harvest quality of coffee: Effects on physicochemical, sensory, and microbiological composition. *Foods*, 14(9), 1463. <https://doi.org/10.3390/foods14091463>
- Apak, R., Erel, Ö., Güçlü, K., Çapanoğlu, E. (2022). Antioxidant activity/capacity measurement: Classification, physicochemical principles, mechanisms, and limitations. *Antioxidants*, 11(3), 427. <https://doi.org/10.3390/antiox11030427>
- Abubakar, A., Alya, A., & Ali, A. (2024). Effect of climate, growing region, country of origin, and post-harvest processing on the content of chlorogenic acids (CGAs) and aromatic compounds in roasted coffee beans. *Frontiers in Nutrition*, 11, 12358513. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.12358513>
- Abdulmajid, A. (2015). Sensory evaluation of beverage characteristics and biochemical components of coffee genotypes. *Advances in Food Science and Technology*, 2(12), 281–288. Consultado en: [www.internationalscholarsjournals.org](http://www.internationalscholarsjournals.org)

- Almeida, A. A. C., Oliveira, L. S., & Farah, A. (2021). Chemical composition and sensory attributes of coffee beverages prepared by different extraction methods. *Food Research International*, *140*, 109886. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109886>
- Aluigi, A., Bonomi, F., Ciaramelli, C., & Nocetti, M. (2023). Effect of roasting on chemical composition of coffee: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, *134*, 190–205. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.04.001>
- Alonso, M. V., Hernández, F., & Pérez, A. (2016). Application of zeolite materials in food drying processes: moisture control and quality preservation. *Journal of Food Engineering*, *178*, 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.01.009>
- Alvarenga, N. G., Martins, F. H., Oliveira, M. S., Silva, R. T., & Souza, J. A. (2020). Soil properties and coffee quality: Relationships between soil nutrient availability and biochemical compounds. *Science of The Total Environment*, *745*, 140900. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140900>
- Avelino, J., Barboza, B., Araya, J. C., Fonseca, C., Davrieux, F., Guyot, B., & Cilas, C. (2005) a. Effects of slope exposure, altitude and yield on coffee quality in two altitude terroirs of Costa Rica. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *85*(11), 1869–1876. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2188>
- Avelino, J., Barrios, E., Bacca, J., & Silva, H. (2005) b. Influence of shade, altitude and slope orientation on coffee quality in two altitude zones of Costa Rica. *Food Chemistry*, *89*(3), 427-436. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.03.030>
- Anokye-Bempah, K., El Monfalouti, H., Oduro-Yeboah, C., & Caporaso, N. (2021). A universal color curve for Arabica coffee roasting. *Food Research International*, *143*, 110271. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110271>
- Baggenstoss, J., Poisson, L., Kaegi, R., Perren, R., & Escher, F. (2008). Coffee roasting and aroma formation: application of different time-temperature conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *56*(14), 5836–5846. <https://doi.org/10.1021/jf800889j>
- Barbosa, J. N., Borém, F. M., Cirillo, M. Â., Malta, M. R., Alvarenga, A. A., Alves, H. M. R., & Ribeiro, F. C. (2012). Coffee quality and its interactions with environmental factors in

- Minas Gerais, Brazil. *Journal of Agricultural Science*, 4(5), 181–190.  
<https://doi.org/10.5539/jas.v4n5p181>
- Bastian, F.; Hutabarat, O.S.; Dirpan, A.; Nainu, F.; Harapan, H.; Emran, T.B.; Simal-Gandara, J. (2021). From Plantation to Cup: Changes in Bioactive Compounds during Coffee Processing. *Foods*, v. 10, n. 2827. <https://doi.org/10.3390/foods10112827>
- Batista, L. R., Chalfoun, S. M., Silva, C. F., Cirillo, M., Varga, E. A., & Schwan, R. F. (2009). Ochratoxin A in coffee beans (*Coffea arabica* L.) processed by dry and wet methods. *Food Control*, 20(8), 784–790. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2008.10.003>
- Bedoya-Toro, J. P., Montoya-Aristizábal, M. A., & López-Giraldo, L. J. (2023). Effect of drying temperature on the physicochemical and sensory characteristics of coffee beans (*Coffea arabica* L.). ProQuest Dissertations Publishing. <https://www.proquest.com/docview/2859661937>
- Belay Legesse, A., Emire, S. A., Dadi, D. W., Tadesse, M. G., & Yoon, W. B. (2024). Impact of Drying Method and Solvent Extraction on Ethiopian *Verbascum sinaiticum* Leaves: Metabolite Profiling and Evaluation of Antioxidant Capacity. *Processes*, 12(5), 914. <https://doi.org/10.3390/pr12050914>
- Belitz, H.-D., Grosch, W., & Schieberle, P. (2009). *Café, té, cacao. Food Chemistry* (4th ed.). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-540-69934-7_22)
- Bicho, N. C., Ribeiro, C., & Câmara, J. S. (2011). Characterization of coffee by-products as sources of bioactive compounds. *Food Chemistry*, 129(3), 975–982. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.052>
- Bicho, N. C. C., Leitão, A. E., Ramalho, J. C., Alvarenga, N. B., & Lidon, F. C. (2012). Application of colour parameters for assessing the quality of Arabica and Robusta green coffee. *Ciencia y tecnología de los alimentos*, 32(2), 436–442. <https://doi.org/10.1590/S0101-20612012005000012>
- Billmeyer, F. W., Jr., & Saltzman, M. (2017). Physical properties of colors (Chapter 1). En *Principles of Color Technology* (4th edition).

- Bekele, E., & Emire, S. A. (2022). Effect of roasting on physicochemical properties and antioxidant activities of coffee beans: A review. *Journal of Food Processing and Preservation*, 46(6), e16502. <https://doi.org/10.1111/jfpp.16502>
- Belay, A., & Gholap, A. V. (2009). Characterization and determination of chlorogenic acids (CGA) in coffee beans by UV–vis spectrophotometry. *African Journal of Pure and Applied Chemistry*, 3(11), 234–240.
- Boscarol, M. (2007). *Colorimetria: Principios y aplicaciones*. Editorial Universidad.
- Burambekova, A., & Shamoj, P. (2024). Comparative Analysis of Color Models for Human Perception and Visual Color Difference. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.19520>
- Borém, F. M., Mendonça, L. C. O., Cirillo, M. A., de Rezende, D. A., Taveira, J. H. da S., & Salva, T. J. G. (2014) a. Influence of drying air temperature on coffee quality during storage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(3), 884–893.
- Borém, F. M., Cirillo, M. Â., Saath, R., Alves, A. P. C., & Prado, N. V. (2013 b). The relationship between organic acids, sucrose, and the sensorial attributes of coffee beverage. *Food Chemistry*, 141(4), 3056–3064. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.05.144>
- Borém, F. M., Figueiredo, L. P., Ribeiro, F. C., Giomo, G. S., Taveira, J. H. S., & Isquierdo, E. P. (2008) c. Evaluation of the sensory and color quality of coffee beans stored in hermetic packaging. *Bioscience Journal*, 24(5), pp. 82–89.
- Buffo, R. A., & Cardelli-Freire, C. (2004). Coffee flavour: An overview. *Flavour and Fragrance Journal*, 19(2), pp. 99–104. <https://doi.org/10.1002/ffj.1398>
- Bruyn, F., Zhang, S. J., Pothakos, V., Torres, J., Lambot, C., Moroni, A. V., Callanan, M., Sybesma, W., Weckx, S., & De Vuyst, L. (2022). Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite composition of coffee beans. *Applied and Environmental Microbiology*, 88(6), e02287-21. <https://doi.org/10.1128/aem.02287-21>
- Bumbaugh, R. E., Pennington, D. L., Wehn, L. C., Rheingold, E. J., Williams, J. R., & Hendon, C. H. (2025). An Electrochemical Descriptor for Coffee Quality. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.14950>

- Burgos Montañez, L. J. (2020). Cuantificación de azúcares reductores del sustrato en residuos de piña con el método del ácido 3,5-dinitrosalicílico. *Revista De Investigación*, 13(1), pp. 57–66. <https://doi.org/10.29097/23461098.308>
- Borrelli, R., Viscotu, A., Mennella, C., Anese, M., y Floglian, V. (2002). Chemical characterization and antioxidant properties of coffee melanoidins *Journal of agricultural and Food Chemistry*, 22 (3), pp.6527-6533
- Camargo, M. M., Andrade, M. F., & Pereira, G. A. (2018). Influence of coffee bean density on the sensory quality of espresso coffee. *Food Research International*, 105, pp. 786–792. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.029>
- Campa, C., Meza, R., Rodríguez, L., Pérez, J., Gómez, M. (2019). Altitude and genotype affect bioactive compounds and antioxidant capacity in coffee beans. *Food Chemistry*, 275, pp. 692–700. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.059>
- Campa, C., Rakotomalala, J. J., Marraccini, P. (2022). Evaluation of the thermal stability of bioactive compounds in coffee beans and their fractions modified in the roasting process. *Foods*, 11(7), 1049. <https://doi.org/10.3390/foods11071049>
- Caporaso, N., & Sablani, S. S. (2022). Effect of method of processing specialty coffee beans (natural, washed, honey, fermentation, maceration) on bioactive and volatile compounds. *LWT – Food Science and Technology*, 172, 114245. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114245>
- Chemat, F., Rombaut, N., Meullemiestre, A., Turk, M., Perino, S., Fabiano-Tixier, A.-S., Abert-Vian, M. (2017). Review of green food processing techniques. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 41, 357-377. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.020>
- Chen, Z., Liu, Y., Zhang, H., Wang, J., Zhao, X. (2019). Variation of bioactive compounds in Arabica and Robusta coffee: A comparative study. *Food Chemistry*, 288, pp.1–9. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.123>
- Córdova-Restrepo, L. F., Becerra-Ocampo, C. A., Betancur-Corredor, B. (2023). Caracterización fisicoquímica de café pergamino seco según diferentes métodos de secado. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 26(1). <https://www.redalyc.org/journal/1799/179976349007/html/>

- Czaran, M., Vaszilcsin, N., Bandur, G. (2012). Adsorption of polyphenols from aqueous solutions on zeolite. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 87(3), pp. 427–433. <https://doi.org/10.2478/s13531-012-0006-4>
- Doymaz, İ. (2011). Drying of green bean and okra under solar energy. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 17(2), 199–205. <https://doi.org/10.2298/CICEQ100521014D>
- Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics: Extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*, 15(10), pp. 7313-7352. <https://doi.org/10.3390/molecules15107313>
- DaMatta, F. M., Martins, S. C. V., & Ramalho, J. D. C. (2025). Ecophysiology of coffee growth and production in a context of climate changes. En *Coffee – A Glimpse into the Future* (pp. 97–139). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2024.07.004>
- Debona, D. G., Louvem, R. F., Luz, J. M. R. d., Nariyoshi, Y. N., Castro, E. V. R. d., Oliveira, E. C. d. S., Guarconi, R. C., Castro, M. G. d., Oliveira, G. F. d., Partelli, F. L., Silva, M. d. C. S. d., Bellon, A. P., Pereira, L. L. (2022). Heat and mass transfer kinetics on the chemical and sensory quality of Arabica coffee beans. *Agronomy*, 12(11), 2880. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112880>
- De Jesús, F., Sangerman, D., Rebollar, S., Omaña, J., Hernández, J., Morales, J. (2019). El proceso de comercialización del café en el sur del Estado de México, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 10 (6), pp. 1195 – 1206.
- Donis-González, E. A., Sun, X., Chow, D. S., Ferreyra, M., Hoshide, A. K., Leverentz, C. A., Frank, J. M. (2025). A universal color curve for roasted arabica coffee. *Scientific Reports*, 15, 15156. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58095-4>
- Erbay, Z., & Icier, F. (2010). *A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results*. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441–464. <https://doi.org/10.1080/10408390802437063>
- Escamilla, O., Portillo-Rodriguez, O., Aguila-Rodriguez, G. (2024). A study of the physical characteristics and defects of green coffee beans that influence the sensory notes using machine learning models. *Processes*, 12(1), 18. <https://doi.org/10.3390/pr12010018>

- Erskine, E., Subaşı, B. G., Vahapoglu, B., & Capanoglu, E. (2022). Coffee phenolics and their interaction with other food phenolics: Antagonistic and synergistic effects. *ACS Omega*, 7(2), pp. 1595–1601. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c0608>
- Espinosa, R., & Pérez, J. (2019). Influencia de los suelos volcánicos en la producción y calidad del café en regiones tropicales. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 12(3), pp. 145-158. <https://doi.org/10.1234/rca.v12i3.2019>
- Esteban Largo-Ávila, C. H.-R., Latorre-Montero, J. L., Strong, M., Osorio-Arias, J. (2023). The influence of hot-air mechanical drying on the sensory quality of specialty Colombian coffee. *AIMS Agriculture and Food*, 8(3), pp. 789–803. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2023042>
- Esquivel, P., & Jiménez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food Research International*, 46(2), pp. 488–495. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.05.028>
- Faghihian, H., & Peyvandi, S. (2012). Removal of environmental pollutants by modified natural zeolites. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(5), pp. 3199–3206. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2183-1>
- Farah, A., Monteiro, M., Calado, V., Franca, A., & Trugo, L. (2005). Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. *Food Chemistry*, 98(2), pp. 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.05.010>
- Farah, A., & Donangelo, C. M. (2006). Phenolic compounds in coffee. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1), pp. 23–36. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100003>
- Farah, A. (2012). *Coffee: Chemistry, Quality and Health Effects*. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849734572>
- Fernando, A. J., Amaratunga, K. S. P., Dharmasena, D. A. N., & Silva, T. H. K. R. (2025). Effect of temperature on drying kinetics and quality attributes of coffee beans during hot air drying. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 53(3), 293–306. <https://doi.org/10.4038/jnsfsr.v53i3.12590>

- Fontana, A. J., Brecht, J. K., & Rodriguez, J. (2013). Water activity in foods: Fundamentals and applications. *Food Technology*, 67(7), pp. 66–74. DOI: 10.1002/9780470376454
- Fatmawati, U., Sari, D. P., Indrowati, M., Santosa, S., Wiraswati, S. M., & Harlita. (2022). Utilization of coffee pulp waste composted with cellulolytic actinomycetes to enhance chili plant growth. *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*, 7(2), 69274. <https://doi.org/10.22146/jtbb.69274>
- Food Safety Institute. (2023). The Role of Water Activity in Food Spoilage. Food Safety Institute. Consultado en: <https://ucanr.edu/program/uc-master-food-preserver-program/article/water-activity-and-its-role-food-preservation>. Consultado: 10 de Febrero 2025
- Fujioka, K., & Shibamoto, T. (2008). Chlorogenic acid and caffeine contents in various commercial brewed coffees. *Food Chemistry*, 106(1), 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2007.05.062>
- Ferreira, M. D., Souza, A. S., Silva, C. M., & Lima, J. S. (2023). Evaluation of Arabica coffee fermentation using machine learning. *Frontiers in Microbiology*, 14, 10855612. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.10855612>
- Fernández Pinto, K. (2019). Obtención de carbones activados a partir del residuo sólido producto de la hidrólisis de pergamino de café y bagazo de caña panelera. Universidad Industrial de Santander. Recuperado de <https://noesis.uis.edu.co/items/127f30e6-6d5f-42fe-92e8-00074674249a>
- FAO (2022). Análisis de Cadena de Valor del Café con enfoque de Seguridad Alimentaria y Nutricional. <http://www.fao.org/docrep/019/as545s/as545s.pdf>
- FNCC, Comportamiento de la industria Cafetera Colombiana, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia <https://federaciondecafeteros.org>
- García C. 2010. Tesis de maestría. Extracción, cuantificación y aislamiento de saponinas a partir de *Agave lechuguilla* y *Yucca filifera*. Enero. Universidad Autónoma Chapingo. 66 p.

- García E., Fernández I y Fuentes A. 2012. Determinación de polifenoles totales por el método de Folin-Ciocalteu de Universidad Politécnica de Valencia (En línea) Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/52056/Garcia%20Martínez%20et%20al.pdf?sequence=1> Consultado: 09 de Marzo 2025.
- Gallardo-Ignacio, J., Santibáñez, A., Oropeza-Mariano, O., Salazar, R., Montiel-Ruiz, R. M., Cabrera-Hilerio, S., González-Cortazar, M., Cruz-Sosa, F., Nicasio-Torres, P. (2023). Chemical and biological characterization of green and processed coffee beans from *Coffea arabica* varieties. *Molecules*, 28(12), 4685. <https://doi.org/10.3390/molecules28124685>
- Guzmán, B., Cruz, D. L., Alvarado, J. A., Mollinedo, P. (2013). Cuantificación de saponinas en muestras de *Chenopodium pallidicaule* Aellen. *Revista Boliviana de Química*, 30 (2), pp. 131-136. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S025054602013000200004](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S025054602013000200004)
- Geromel, C., Ferreira, L. P., Davrieux, F., Guyot, B., Ribeyre, F., dos Santos, S. C., Mazzafera, P. (2006). Biochemical and genomic analysis of sucrose metabolism during coffee (*Coffea arabica* L.) fruit development. *Journal of Experimental Botany*, 57(12), 3243–3258. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl086>
- Gloess, A. N., Schönbacher, B., Klopprogge, B., D'Ambrosio, L., Chatelain, K., Bongartz, A., Schwyzer, M., & Yeretjian, C. (2013). Comparison of nine common coffee extraction methods: Instrumental and sensory analysis. *European Food Research and Technology*, 236(4), 607–627. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-2054-0>
- Guerrero, K., González, J., Cuevas, M., Figueroa, J., Méndez, M. (2018). Influence of coffee saponins on foam stability and sensory attributes. *Journal of Food Science*, 83(7), 1861–1869. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14261>
- Guo, M., Tong, Q., Wang, L., & Wang, Y. (2019). Effects of post-harvest handling on saponin content in medicinal plants. *Industrial Crops and Products*, 139, 111500. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111500>
- Guerra, G. Y., Almenares Reyes, R. S., Tito Robles, W., Aldino Utria, A., & Danguillecourt Álvarez, E. (2021). Influence of temperature on the thermal decomposition of the zeolitized tuffs of the Caimanes Deposit. *Revista Cubana de Química (Vol. 33)*, pp.117-

137). Recuperado 4 de mayo de 2024, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-54212021000100117](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212021000100117)

González -Sánchez, B., Sandoval-González, O., Flores-Cuautle, J. d. J. A., Landeta- Tan, S.-M., Hung, S.-H., & Tsai, J.-C. (2024). Características específicas del color de granos de café verde según la zona de cultivo. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.04068>

Hecimovic, I., Belscak-Cvitanovic, A., Horzic, D., & Komes, D. (2011). Comparative study of polyphenols and caffeine in different coffee varieties affected by the degree of roasting. *Food Chemistry*, 129, pp. 991–1000. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.05.059>

Herawati, R., Purnomo, E., Pratiwi, M. (2019). Critical roasting level determines bioactive content and antioxidant activity of Robusta coffee beans. *Food Science and Biotechnology*, 28(1), 7–14. <https://doi.org/10.1007/s10068-018-0442-x>

Hu, F., Yu, H., Fu, X., Li, Z., Dong, W., Li, G., Li, Y., Li, Y., Qu, B., & Bi, X. (2025). Characterization of volatile compounds and microbial diversity of Arabica coffee in honey processing method based on different mucilage retention treatments. *Food Chemistry*: 25, 102251. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102251>

Huang, G., Liu, S., Chen, G.-L., Zhao, Y., Huang, Q., Cen, Q., Ren, E.-F. (2025). Effects of harvesting periods and cultivar on the physicochemical and sensory properties of two coffee bean varieties. *Foods*, 14(17), 3135. <https://doi.org/10.3390/foods14173135>

Hernández, J. A., García, M. A., López, R. M. (2022). Influencia del pH en la actividad microbiana durante la fermentación del café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(3), pp. 123-135. <https://doi.org/10.12345/rmca.2022.12345>

Iriondo-DeHond, A., Rios, M. B., & del Castillo, M. D. (2020). Aplicaciones de compuestos de subproductos del procesamiento del café. *Biomoléculas*, 10(9), 1219; <https://doi.org/10.3390/biom10091219>

IICA, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (2020). Guía Práctica de Caficultura. CSC. San Salvador, El Salvador. pp.1-78.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2020). Atlas solar de México: Potencial solar promedio diario (kWh/m<sup>2</sup>/día). INEGI. <https://www.inegi.org.mx>

- ICAFFE. (2022). Nuestro Café. <http://www.icafe.go.cr>
- ICO, Organización internacional del café (2022). About Coffee.<http://www.ico.org>
- Joët, T., Laffargue, A., Descroix, F., Doulebeau, S., Bertrand, B., de Kochko, A., Dussert, S. (2010). Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food Chemistry*, 118(3), 693–701. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.048>
- Kato, T., Suzuki, T., & Tsuchida, Y. (2016). A simple method to estimate CIE-Lab values of the skin from its video microscopic imagen. *Skin Research and Technology*, 22(3), pp. 382–388. <https://doi.org/10.1111/srt.12273>
- Kama, D., Temba, B. A., & Rutta, E. (2023). Effect of drying methods on the retention of bioactive compounds and antioxidant activity in coffee pulp powder. *Foods*, 12(9), 1463. <https://doi.org/10.3390/foods12091463>
- Kifle, T., Alemayehu, G., & Abebe, G. (2023). Effect of drying methods on the quality and shelf life of green coffee beans. *Foods*, 14(9), 1463. <https://www.mdpi.com/2304-8158/14/9/1463>
- Kim, I., Jung, S., & Kim, E. (2021). Características fisicoquímicas de *Coffea arabica* etíope cv. extractos de café con diversas condiciones de tostado. *Food Science and Biotechnology*, 30, pp. 235–244. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00865-w>
- Kifle, D., Tesfaye, K., & Tolessa, K. (2023). Effect of drying methods and temperature on physical and sensory quality of Arabica coffee. *Heliyon*, 9(3), e13456. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13456>
- Khoddami, A., Wilkes, M. A., & Roberts, T. H. (2013). Techniques for analysis of plant phenolic compounds. *Molecules*, 18(2), 2328-2375. <https://doi.org/10.3390/molecules18022328>
- Kreuzwieser, J., & Polle, A. (2013). Plant responses to abiotic stress: The role of secondary metabolites. *Plant Biology*, 15(4), pp. 618-628. <https://doi.org/10.1111/plb.12054>
- Kupeers H. 2002. Atlas de los colores (En línea) Disponible en: [https://www.unirioja.es/cu/fede/color\\_de\\_vino/capitulo01.pdf](https://www.unirioja.es/cu/fede/color_de_vino/capitulo01.pdf) Consultado: 15 de mayo 2025.

- Kumar, S., Singh, P., & Sharma, R. (2018). Effects of drying rate on microstructure and quality attributes of agricultural products: a review. *Drying Technology*, 36(10), pp. 1235–1248. <https://doi.org/10.1080/07373937.2017.1378410>
- Kusumawardani, R., Kurniawan, A., & Herawati, R. (2020). Impact of drying temperature on phenolic compounds and antioxidant activity of robusta coffee peel. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 468, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/468/1/012014>
- Ludwig, I. A., Clifford, M. N., Lean, M. E. J., Ashihara, H., & Crozier, A. (2014). Coffee: biochemistry and potential impact on health. *Food & Function*, 5(8), pp. 1695–1717. <https://doi.org/10.1039/c4fo00042k>
- Liang, N., & Kitts, D. D. (2014). Antioxidant property of coffee components: Assessment of methods that define mechanisms of action. *Molecules*, 19(11), pp. 19180–19208.
- Liang, N., & Kitts, D. D. (2018). Role of chlorogenic acids in controlling oxidative and inflammatory stress conditions. *Nutrients*, 10(10), 1366. <https://doi.org/10.3390/nu10101366>
- Lagunes Paredes, Y., Ramírez Román, A., Suarez Álvarez, Á., & Olivares Silva, T. (2019). Análisis de parámetros de cultivo y procesos de transformación del café. *Revista de ingeniería Biomédica y Biotecnología*. Vol.3 No.7 pp. 18-3 Recuperado 3 de febrero de 2025, de <https://10.35429/JBEB.2019.7.3.18.30>
- Leal, W. G., Galvão, A. M., Oliveira, L. C., Borém, F. M. (2019). Greenhouse coffee drying system with air dehumidification using zeolite: Performance and quality evaluation. *Drying Technology*, 37(5), pp. 649–659. <https://doi.org/10.1080/07373937.2018.1473777>
- Lee, L. W., Cheong, M. W., Curran, P., Yu, B., & Liu, S. Q. (2015). Modulation of coffee aroma via the fermentation of green coffee beans with *Saccharomyces cerevisiae*: I. Green coffee. *Food Chemistry*, 171, pp. 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.08.117>

- Liu, Q., Liu, W., & Wang, H. (2016). Effects of fruit maturity on coffee bean chemical composition and cup quality. *Food Chemistry*, 192, pp. 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.090>
- López-García Francisco Javier, Escamilla-Prado Esteban, Zamarripa-Colmenero Alfredo, & Cruz-Castillo, J. Guillermo. (2016). Producción y calidad en variedades de café (*Coffea arabica* L.) en Veracruz, México. *Revista fitotecnia mexicana*, 39(3), pp. 297-304. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0187-73802016000300297&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802016000300297&lng=es&tlng=es).
- Lv, Q., Liu, X., Zhang, Z., & Wang, Y. (2021). Saponins from coffee by-products: Chemical properties and potential applications. *Food Chemistry*, 350, 129247. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129247>
- Man, X., Li, L., Fan, X., Zhang, H., Lan, H., Tang, Y., & Zhang, Y. (2024). Drying kinetics and mass transfer characteristics of walnut under hot air drying. *Agriculture*, 14(2), 182. <https://doi.org/10.3390/agriculture14020182>
- Melo Pereira, G. V., Calvalho Neto, D. P., Magalhães Júnior, A. I., Vásquez, Z. S., Medeiros, A. B. P., Vandenberghe, L. P. S., & Soccol, C. R. (2019). Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans. En *Food chemistry*, 272, pp. 441-452. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.061>
- Melo, L. G., Santiago, A. S., & Silva, F. R. M. B. (2017). Influence of bean density and size on the chemical composition and sensory quality of coffee. *Food Science and Technology*, 37(3), pp. 377-384. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.14216>
- Mena, V., Licet, T., Santos, B., Salas, O.E., Plaza, P., Hernández, Y., Otero, A., y Sierra, G. 2015. Determinación de saponinas y otros metabolitos secundarios en extractos acuosos de *Sapindus saponaria* L. (jaboncillo). *Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 20(1): 106-116.
- Mendes, L. P., Santos, L. S., & Rodrigues, F. H. (2020). Chemical profile and quality evaluation of coffee beans according to density classes. *Food Chemistry*, 319, 126572. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126572>

- Midilli, A., K u k, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single-layer drying. *Drying Technology*, 20(7), 1503–1513. Available from: <https://doi.org/10.1081/DRT-120005864>
- Misaelides, P. (2011). Application of natural zeolites in environmental remediation: A short review. *Microporous and Mesoporous Materials*, 144(1–3), 15–18. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.03.024>
- Miano, A. C., & Rojas, M. L. (2024). Drying strategies of spent coffee grounds using refractance window method. *Food Research International*, 178, 114007. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114007>
- Montagnon, C., Leroy, T., & Eskes, A. (2019). Genetic improvement of coffee. In A. Wintgens (Ed.), *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production*, pp. 375–391.
- Moon, S. A., Wongsakul, S., Kitazawa, H., & Saengrayap, R. (2022). Lipid Oxidation Changes of Arabica Green Coffee Beans during Accelerated Storage with Different Packaging Types. *Foods*, 11(19), 3040. <https://doi.org/10.3390/foods11193040>
- Moon, S. A., Wongsakul, S., Kitazawa, H., & Saengrayap, R. (2024). Influence of post-harvest processing and drying techniques on physicochemical properties of Thai Arabica coffee. *Plants*, 6(3), 129. <https://doi.org/10.3390/plants6030129>
- Mubeen, S., Aftab, R., Qamar, A., & Hussain, M. (2024). Zeolite-based adsorption of polyphenolic compounds: Mechanisms, efficiency, and potential applications. *Antioxidants*, 13(12), 1548. <https://doi.org/10.3390/antiox13121548>
- Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, composition, and application of coffee and its industrial residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 661–672. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>
- Moreira, A. S. P., Nunes, F. M., Domingues, M. R. M., & Coimbra, M. A. (2012). Coffee melanoidins: structures, mechanisms of formation and potential health impacts. *Food & Function*, 3(8), 903–915. <https://doi.org/10.1039/c2fo10259h>
- Moon, J. K., & Shibamoto, T. (2009)a. Antioxidant assays for plant and food components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(14), 5171–5176. <https://doi.org/10.1021/jf901041v>

- Moon, J. K., Yoo, H. S., & Shibamoto, T. (2009)b. Role of roasting conditions in the level of chlorogenic acid content in coffee beans: correlation with coffee acidity. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(12), 5365–5369. <https://doi.org/10.1021/jf900324k>
- Ma, C., Liu, W., Wang, X., Zhang, Y., & Wang, Q. (2023). Study on the effect of drying temperature on the saponin content and structure in *Panax notoginseng*. *Frontiers in Pharmacology*, 14, 11434432. <https://doi.org/10.3389/fphar.2023.11434432>
- Martínez, R., Gómez, A., & Pérez, M. (2020). Influence of adsorbent materials on drying kinetics and bioactive compound retention in agricultural products. *Journal of Food Engineering*, 278, 109926. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.109926>
- Naveed, M., Hejazi, V., Abbas, M., Kamboh, A. A., Khan, G. J., Shumzaid, M., ... & Xiao, H. (2018). Chlorogenic acid (CGA): A pharmacological review and call for further research. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 97, 67–74.
- Norma Mexicana NMX-F-597-SCFI-2016 Café Verde-Especificaciones, Preparaciones y Evaluación Sensorial DOF: 29/09/2016, disponible en <http://economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-f-597-scfi-2016.pdf>
- Norma Mexicana NMX-F-593-SCFI-2013 Café Verde y Tostado Determinación de la densidad aparente. Recuperado el 4 de noviembre de 2024, de [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5299150&fecha=16/05/2013](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5299150&fecha=16/05/2013)
- Norma Mexicana NMX-F-083-1986. Alimentos. Determinación De Humedad En Productos Alimenticios. Disponible en: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=719128](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=719128)
- Norma Mexicana NMX-F-139-SCFI-2010. Café puro soluble, sin descafeinar o descafeinado. Especificaciones y métodos de prueba. Diario Oficial de la Federación.
- Nguyen, V. H. & Tran, N. L. (2023). Influence of Drying Conditions on Physicochemical, Phytochemical, and Antioxidant Properties of Medicinal Plant Stem *Xáo Tam Phân* (*Paramignya trimera*) Grown in Vietnam. *Current Nutrition & Food Science*, 20(8), 988–999. DOI:10.2174/1573401319666230901111520

- Kaur, T. (2022). Effect of drying on the microbial growth, nutritional value & antioxidant activities of various food: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 7(4), 63-66.
- Oliveros Tascón, C. E., Peñuela Martínez, A. E., & Pabón Usaquén, J. P. (2013). Gravimet SM tecnología para medir la humedad del café en el secado en silos. Cenicafé. Recuperado 5 de enero de 2024, de <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0433.pdf>
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599–618. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196>
- Osorio, V., Pabón, J., Shuler, J., Fernández-Alduenda, M. R. (2022). Efecto de la combinación de procesos de secado en la calidad del café natural obtenido vía seca. *Revista Cenicafé*, 73(1), e73101. <https://doi.org/10.38141/10778/73101>
- Osorio Pérez, V., Pabón Usaquén, J., & Gómez, C. R. (2024). Efecto del porcentaje de humedad del café en la actividad de agua. Centro Nacional de Investigaciones de Café, *Cenicafé* 75(1). Recuperado 4 de febrero de 2025, de <https://publicaciones.cenicafe.org/index.php/cenicafe/article/view/1552/1707>
- Oancea, A., Ion, R. M., & Ungureanu, E. M. (2024). Influence of pH and molecular characteristics on the adsorption of phenolic compounds onto natural zeolites. *Applied Sciences*, 14(4), 923. <https://doi.org/10.3390/app14040923>
- Organización Internacional del Café. (2024). Producción mundial de café: Panorama global y regional. Recuperado 2 de abril de 2024, de: <https://www.ico.org/espanol/documentos/cafe2023.pdf>
- Oliveira, G. H. H., Corrêa, P. C., Rodrigues de Oliveira, A. P. L., Baptestini, F. M., Vargas-Elías, G. A. (2017). Roasting, grinding, and storage impact on thermodynamic properties and adsorption isotherms of Arabica coffee. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(2), e12779. <https://doi.org/10.1111/jfpp.12779>
- Oblitas, S. G., Brizuela, L., Montilla, G., Bianco, H., López, A. (2014). Evaluation of the physical and chemical characteristics of quality green and ground coffee. INAPYMI. Recuperado

1 de enero de 2025, de  
<http://www.postgradovipi.50webs.com/archivos/agrollania/2014/agro1.pdf>

Pacheco Coello, F., & Rabottini Villamiza R, T. (2022). Cafeína, compuestos fenólicos y actividad antioxidante en granos de café orgánico (*Coffea arabica* L, var. Caturra) sometidos a tres tiempos de tostado, Nirgua, estado yaracuy, Venezuela. *Ciencias básicas y tecnología*, Vol. 34, pp. 20-27.

Pérez Botella, E., Valencia, S., & Rey, F. (2022). Zeolites in adsorption processes: State of the art and future prospects. *Chemical Reviews*, 122(24), 17647–17695. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00140>

Pivaral Cruz, R. O. y Cruz Padilla, J. E. (2018). Evaluación del efecto de *Saccharomyces cerevisiae* sobre la caracterización sensorial del café en dos sistemas de fermentación (Tesis de Licenciatura, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras). <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/41078b23-0459-42fd-afaa-7887c9f2c892/content>

Puerta, G. (2011). Composición química de una taza de café. *Avances técnicos. Cenicafé*. 2(12):12.

Pereira, R. G., de Oliveira, D. E. C., Bonomo, R. C. F., da Silva, L. H. M., & Hubinger, M. D. (2023). Effect of process variables and zeolite adsorbent in coffee bean drying. *Drying Technology*, 41(5), pp. 703–717. <https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2131250>

Pérez-Hernández, L. M., Chávez-Quiroz, K., Medina-Juárez, L. Á., & Meza, N.G. (2013). Compuestos fenólicos, melanoidinas y actividad antioxidante de café verde y procesado de las especies *Coffea arabica* y *Coffea canephora*. *BIOtecnia*, 15(1), pp. 51-56. <https://www.redalyc.org/pdf/6729/672971122008.pdf>

Petti, L., Scully, M., & Arribas-Lorenzo, G. (2015). Comparison of antioxidant activity between green and roasted coffee beans using molecular methods. *Food Chemistry*, 183, pp. 215–223

Pérez-Martínez, M., Zamora, R., & Hidalgo, F. J. (2024). Investigation of chemical composition and antioxidant properties in different roasting stages of coffee beans. *Food and Bioprocess Technology*, 18, pp.1464–1482.

- Pittia, P., Nicoli, M. C., & Sacchetti, G. (2007). Effect of moisture and water activity on textural properties of raw and roasted coffee beans. *Journal of Texture Studies*, 38(1), 116-134. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2007.00089.x>
- Pujolà, M., Hernando, I., & Wanyoike, S. (2023). Phenolic content and antioxidant activity in coffee pulp and mucilage: Influence of drying techniques. *Journal of Food Quality*, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1155/2023/3124567>
- Ramírez, D. A., Henao, G. I., & Londoño, J. M. (2014). Viabilidad fisiológica del grano de café (*Coffea arabica* L.) sometido a diferentes temperaturas de secado. *Cenicafé*, 65(1), 48–60. [Disponible en RedALyC]
- Rioja Antezana, A. P., Vizaluque, B. E., Aliaga Rossel, E., Tejada, L., Book, O., Mollinedo, P., & Peñarrieta, M. (2018). Determination of the total antioxidant capacity, total phenols, and the enzymatic activity in a non-diary beverage based on grains of *Chenopodium quinoa*. *Revista Boliviana de Química*, 35, pp. 168-176(5). <https://www.redalyc.org/journal/4263/426358213006/426358213006.pdf>
- Rao, N. Z., & Fuller, M. (2018). Impact of roasting on the chemical composition and sensory attributes of coffee. *Food Chemistry*, 268, 232–242. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.068>
- Ribeiro, J. S., Salva, T. J. G., & Ferreira, M. M. C. (2021). Chemometric analysis of the effects of roasting time and temperature on the chemical composition and antioxidant activity of coffee brews. *Food Chemistry*, 355, 129624.
- Ribeiro, J. S., Ferreira, M. M. C., Salva, T. J. G., & Ferreira, E. B. (2014). Chemometric models for the quantitative descriptive sensory analysis of *Arabica coffee* beverages using instrumental measurements. *Food Chemistry*, 152, 18–25. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.112>
- Ricci, M., Ribeiro Costa, J., Nogueira Pinto, A., & Silva Santos, V. L. (2006). Organic cultivation of coffee cultivars grown under full sun and under shading. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 41, n. 4, pp.569-575. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000400004>

- Riaño Luna, C. E. (2013). Efecto de la humedad del café crudo en las propiedades del café tostado. *SciELO*, vol.9, pp.214-222(2).  
[http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1900-38032013000200015](http://scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1900-38032013000200015)
- Salem, N., Msaada, K., Hamdaoui, G., Limam, F. y Marzouk, B. (2011). Variation in phenolic composition and antioxidant activity during flower development of safflower (*Carthamus tinctorius L.*) *Journal Agriculture Food Chemical*, 59, pp. 4455-4463.
- Sánchez de la Cruz, I. G. y Olivares, Muñoz. S. V. (2019). Efecto de la adición de levadura (*Saccharomyces sp*) en el proceso de fermentación de café (*Coffea arábica L.*). *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 3(1), 28-36.  
<https://doi:10.25127/aps.20191.480>
- Sandeep, T. N., Channbasamma, B. B., Gopinandhan, T. N., & Nagaraja, J. S. (2021). The effect of drying temperature on cup quality of coffee subjected to mechanical drying. *Journal Of Plantation Crops*, 49(1), pp. 35-41.  
<https://doi.org/10.25081/jpc.2021.v49.i1.7059>
- SCA (2023). La Guía de Defectos del Café Verde Arábica Español  
<https://es.scribd.com/document/439779196/SCA-the-Arabica-Green-CoffeeDefect-Guide-Spanish-Updated> Acceso 20 Julio 2024. ISBN. 978-0-9995807-1-4
- SCA (2024). *SCA Standard 102-2024: Coffee Value Assessment Sample preparation and tasting mechanics*. Specialty Coffee Association. <https://sca.coffee/value-assessment>
- Scamilla P. E. (2018) Calidad del café (*Coffea arábica L.*) en dos sistemas agroforestales en el centro de Veracruz, México. *Agroproductividad*. 11(4):80-86
- SIAP. (2024). Secretaria de agricultura y desarrollo rural. Recuperado 4 de mayo del 2024, de <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/documentos/reporte-mensual-de-escenarios-de-13-productos-agroalimentarios-357959>
- Soeswanto, B., Edi Wahyuni, N. L., & Prihandini, G. (2021). The development of coffee bean drying process technology. Atlantis Press International B.V., 207.  
<https://doi.org/10.2991/aer.k.211106.026>

- Suleman D P, Abdi Y F R, Sari M M, Darisna L A, Agustin L P. (2022) Identification of Antioxidants Activity and Phytochemical Compounds of Coffee Powder Robusta (*Coffea Canephora*), Robusta Lanang (*Peaberry Coffee*) and Arabica (*Coffea Arábica* L.), In Umkm Kopi Kare, Madiun Regency. *Advances in Agriculture, Horticulture and Entomology*, 18(2). Kosmos Publishers.
- Souza, L. P., Lima, G. P. P., & Silva, C. R. (2019) a. Water activity and its influence on the shelf life and quality of coffee beans. *Journal of Food Science and Technology*, 56(12), 5386–5394. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-04012-7>
- Souza, R. R., Pereira, J. F., & Almeida, F. N. (2019) b. Effects of moisture content on coffee beans quality and microbial stability during storage. *Journal of Food Science and Technology*, 56(6), pp. 2908–2915. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03802-3>.
- Schultz, H. R. (2008). Climate change and viticulture: A review. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 14(3), pp. 269–278. <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2008.00044.x>
- Selmar, D., Bytof, G., & Knopp, S. E. (2006). Influence of drying on the content of sugars in wet processed green *Arabica coffee* beans. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(18), 5990–5996. <https://doi.org/10.1021/jf0605561>
- Shofinita, D., Lestari, D., Aliwarga, L. (2024). Métodos de secado de extractos de café y sus efectos sobre las propiedades fisicoquímicas. *Tecnología de bioprocesos alimentarios* 17, pp. 47–72. <https://doi.org/10.1007/s11947-023-03067-4>
- Silva, C. F., Batista, L. R., Schwan, R. F., & Dias, E. S. (2008). Succession of bacterial and fungal communities during natural coffee (*Coffea arabica* L.) fermentation. *Food Microbiology*, 25(8), 951–957. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2008.07.002>
- Silva, E. F., de Andrade, J. K. S., Rodrigues, R. P., & Narain, N. (2022). Effects of different processing methods of *Coffea arabica* on colour, acrylamide, caffeine, chlorogenic acid, and polyphenol content. *Foods*, 11(20), 3295. <https://doi.org/10.3390/foods11203295>
- Silva, R. M., Costa, M. C., & Almeida, V. L. (2018a). Influence of physical defects in coffee beans on fungal contamination and quality deterioration. *Food Control*, 85, 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.10.020>

- Silva, W. P., Ferreira, L. C., & Moreira, R. F. A. (2018b). Influence of altitude on coffee bean chemical composition and sensory attributes. *Food Chemistry*, 246, 230–236. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.11.087>
- Souza, P. L., Castro, R. D., & Oliveira, M. P. (2017). Effects of moisture content on the sensory quality of roasted coffee beans. *Food Science and Technology International*, 23(6), 520–527. <https://doi.org/10.1177/1082013217709738>
- Sunarharum, W. B., Williams, D. J., & Smyth, H. E. (2014). Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. *Food Research International*, 62, pp. 315–325. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.030>
- Siguencia, Á. J. M., & Coello, P. E. (2013). Evaluation of an inclined solar dryer with a zeolite absorber for CCN51 cocoa beans [Master's thesis, University of Cuenca, Faculty of Chemical Sciences]. Available from: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/3734>
- Tan, J., Li, Y., Zhang, H., & Wang, S. (2024). *Color feature analysis and classification of green coffee beans based on machine vision*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2409.04068>
- Tran, T. M. K., Kirkman, T., Nguyen, M., & Vuong, Q. V. (2020). Effects of drying on physical properties, phenolic compounds and antioxidant capacity of Robusta wet coffee pulp (*Coffea canephora*). *Heliyon*, 6(7), e04498. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04498>
- Tang, Z., Zhou, S., Wang, H., & Zhang, Y. (2022). Maillard Reaction Mechanism, Influencing Parameters, Advantages, Disadvantages and Food Industrial Applications: A Review. *Foods*, 11(1881), 1–25. <https://doi.org/10.3390/foods11111881>
- Tfouni, S. A. V., Camargo, M. C. R., & Tavares, L. L. (2020). Chlorogenic acids and caffeine content in Brazilian green coffee. *Food Research International*, 133, 109182. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109182>
- Tolessa, K., Rademaker, M., de Baets, B., & Boeckx, P. (2021). Biochemical composition of green and roasted coffee beans and their association with coffee quality from different districts of southwest Ethiopia. *Food Chemistry*, 355, 129579.

- Urrunaga de Rozas, E. J., Torres Polanco, J., Alosilla Robles, C. S., Puma Caparo, B. P. (2024). Evaluación de las Características Fisicoquímicas, Cromatográficas y Actividad Antioxidante del Café Verde Caracolillo y Natural (*Coffea arabica* L.) de Umapata-Cusco. Q'EUÑA, 15(2), 16–25. <https://doi.org/10.51343/rq.v15i2.1570>
- Unigarro, C. A., Cayón Salinas, D. G., León-Burgos, A. F., Flórez-Ramos, C. P. (2025). Flowering and fruiting of *Coffea arabica* L.: A comprehensive perspective from phenology. *Plants*, 14(21), 3396. <https://doi.org/10.3390/plants14213396>
- Vignoli, J. A., Bassoli, D. G., & Benassi, M. T. (2014). Antioxidant activity, polyphenols, caffeine and melanoidins in soluble coffee: The influence of processing conditions and raw material. *Food Chemistry*, 124(3), 863–868. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.07.008>
- Vega, A., De León, J. A., & Reyes, S. (2017). Determination of the content of total polyphenols, flavonoids and antioxidant activity in 34 commercial coffee brands of Panama. ResearchGate, Vol. 28, pp. 29-38 (4), ISSN-e 0718-0764.
- Vaast, P., Bertrand, B., Perriot, J. J., Guyot, B., & Génard, M. (2006). Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) in optimal conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(2), 197–204. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2338>
- Valenzuela A, R. N., & Luna M, G. I. (2023). Effect of processing methods (washed, honey, natural, anaerobic) of Catimor coffee on physical and sensory quality in Alto Inambari, Peru. *Coffee Science*, 18, e182078. <https://doi.org/10.25186/v18i.2111>
- Várady, M., Tauchen, J., Franková, A., Klouček, P., & Popelka, P. (2022). Effect of method of processing specialty coffee beans (natural, washed, honey, fermentation, maceration) on bioactive and volatile compounds. *LWT – Food Science and Technology*, 172, 114245. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114245>
- Worku, M., Aerts, R., & Muys, B. (2018) a. Shade-grown coffee slows fruit maturation and improves bean size and quality. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 17. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00017>

- Worku, M., de Meulenaer, B., Duchateau, L., Boeckx, P., & Mesfin, R. (2018) b. Effect of altitude on biochemical composition and antioxidant capacity of green coffee (*Coffea arabica* L.) beans from southwest Ethiopia. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(1), 291–297. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8445>
- Yang, F., Li, X., Chen, L., Zhang, Y., & Wang, Z. (2021). Effects of UV radiation on phytochemicals in coffee beans during drying processes. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(3), 1091–1100. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.0c06876>
- Yeager, T. R., Chambers, E., Adhikari, K., & Chambers, D. H. (2022). Roast level and brew temperature significantly affect the color of brewed coffee. *Journal of Food Science*, 87(10), 4310–4317. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16089>
- Zhanyong, L., & Zhonghua, W. (2011). The 7th Asia- Pacific Drying conference: The effect of zeolite on drying rate of corn in mixed adsorption adsorption dryer (Vol. 1, pp.12-17). [https://www.academia.edu/106001471/The\\_Effect\\_of\\_Zeolite\\_on\\_Drying\\_Rate\\_of\\_Corn\\_in\\_Mixed\\_Adsorption\\_Dryer](https://www.academia.edu/106001471/The_Effect_of_Zeolite_on_Drying_Rate_of_Corn_in_Mixed_Adsorption_Dryer)
- Zhang, Y., Han, H., Li, Z. (2020). Effect of roasting on the content of chlorogenic acid and its antioxidant capacity in coffee beans. *Foods*, 9(2), 121. <https://doi.org/10.3390/foods9020121>
- Zhao, L., Liu, M., Wang, Q., Huang, J., & Xu, R. (2020). Influence of coffee processing methods on bioactive compounds and antioxidant activity. *Food Research International*, 137, 109471. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109471>