



Efectos de la fermentación sumergida sobre la calidad del café en Coatepec, Veracruz, México*

Effects of submerged fermentation on coffee quality in Coatepec, Veracruz, Mexico

Antonio Arrechea-Villacampa¹, Ofelia Andrea Valdés-Rodríguez¹, Lorena Patricia Sánchez-Morales¹,
Lisseth Valdés-Montegudo¹

* Recepción: 19 de agosto, 2025. Aceptación: 16 de febrero, 2026. Este documento formó parte de la tesis del primer autor titulada Evaluación de la sustentabilidad, calidad del agua y métodos de fermentación en el beneficiado del café en fincas de la región cafetalera de Coatepec, Veracruz, México, financiada por la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnologías e Innovación (SECIHTI) de México.

¹ El Colegio de Veracruz. Xalapa, México. antonioarrechea87@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0000-9059-1753>); dra.valdes.colver@gmail.com (autora para correspondencia; <https://orcid.org/0000-0002-3702-6920>); lorena.samadhi@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0004-3159-4259>); lissethvm92@gmail.com (<https://orcid.org/0009-0004-3584-0111>).

Resumen

Introducción. La fermentación es una etapa crítica en el beneficiado húmedo del café, con el potencial de modificar significativamente su perfil sensorial; no obstante, su influencia varía según el método aplicado. **Objetivo.** Evaluar la influencia de dos métodos de fermentación (aeróbica y anaeróbica) sobre la calidad física y sensorial de una mezcla de café *Coffea arabica* L. (variedades Caturra, Mundo Nuevo, Costa Rica y Geisha), cultivada en la región de Coatepec, Veracruz, México, y procesada mediante beneficiado húmedo. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó durante la cosecha de 2025 (enero-marzo) en la Finca Bímori, ubicada en la región cafetalera de Coatepec, Veracruz, México. Se empleó un diseño completamente aleatorizado y se aplicaron dos métodos de fermentación, con tres réplicas y comparaciones de medias ($p < 0,05$). Se registraron las variables sólidos solubles (°Brix), sólidos disueltos totales (TDS), pH, temperatura, conductividad eléctrica (CE), demanda química de oxígeno (DQO) y carbono orgánico total (COT). Posteriormente, se evaluaron la humedad, la densidad y el rendimiento final, tanto en café pergamino seco como en café verde. La calidad sensorial se analizó conforme al protocolo de la Specialty Coffee Association. **Resultados.** En ambos métodos se observó un aumento significativo en TDS, CE, DQO, COT y °Brix, y una disminución del pH; sin embargo, no hubo diferencias significativas en las variables físicas. La fermentación aeróbica obtuvo un puntaje de 80,8 con notas de chocolate y caramelo, mientras que la anaeróbica alcanzó 82,7 con notas frutales y cítricas. **Conclusiones.** Los métodos de fermentación aeróbica y anaeróbica aplicados a la mezcla de café analizada no ejercieron una influencia sustancial sobre la calidad física del grano; sin embargo, el método anaeróbico generó un perfil sensorial más complejo en sabores y con mayor diversidad aromática.

Palabras clave: calidad física, calidad sensorial, fermentación aeróbica, fermentación anaeróbica.



Abstract

Introduction. Fermentation is a critical stage in the wet processing of coffee, with the potential to significantly modify its sensory profile. However, its influence on physical and sensory quality varies depending on the method applied. **Objective.** To evaluate the influence of two fermentation methods (aerobic and anaerobic) on the physical and sensory quality of a *Coffea arabica* L. blend (varieties Caturra, Mundo Nuevo, Costa Rica, and Geisha) cultivated in the Coatepec region, Veracruz, Mexico, and processed using the wet method. **Materials and methods.** The study was conducted during the 2025 harvest season (January–March) at Finca Bímori, located in the coffee-growing region of Coatepec, Veracruz, Mexico. A completely randomized design (CRD) was used. Two fermentation methods were applied, with three replicates and mean comparisons ($p < 0.05$). During fermentation, the following variables were recorded: soluble solids (°Brix), total dissolved solids (TDS), pH, temperature, electrical conductivity (EC), chemical oxygen demand (COD), and total organic carbon (TOC). Afterwards, moisture content, density, and final yield were evaluated in both dry parchment coffee and green coffee. Sensory quality was assessed according to the Specialty Coffee Association protocol. **Results.** A significant increase was observed in TDS, EC, COD, TOC, and °Brix, along with a decrease in pH under both methods. No significant differences were found in physical variables. The aerobic fermentation scored 80.8, with chocolate and caramel notes, while the anaerobic fermentation scored 82.7, with fruity and citrus notes. **Conclusions.** The aerobic and anaerobic fermentation methods applied to the coffee blend cultivated in the Coatepec region and processed through the wet method did not significantly influence the physical quality of the beans; however, the anaerobic method produced a more complex sensory flavor profile with greater aromatic diversity.

Keywords: physical quality, sensory quality, aerobic fermentation, anaerobic fermentation.

Introducción

El café (*Coffea arabica* L. y *Coffea canephora*) es uno de los cultivos agrícolas más importantes a nivel mundial. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2025), en 2023 se produjeron más de 11 millones de toneladas en más de 12 millones de hectáreas, distribuidas en al menos 70 países. En México, al cierre de 2024, *Coffea arabica* L. ocupó una superficie de 701 335,30 ha, con una producción de 1 056 371,46 t y un rendimiento cercano a 1,6 ton/ha. El Estado de Veracruz, a finales de 2023, se posicionó como el segundo estado más productivo, con aproximadamente el 24 % de la producción nacional (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2025).

La calidad sensorial del café es un atributo que influye significativamente en el valor comercial del producto y constituye una de las principales demandas del mercado actual; sin embargo, está determinada por múltiples factores (Sánchez Hernández, 2023). La calidad se relaciona con parámetros como el aroma, el sabor, el cuerpo y la acidez, los cuales se ven influenciados por factores genéticos y ambientales (altitud, temperatura y tipo de suelo), así como por los métodos de procesamiento poscosecha (Osorio Pérez, 2021).

Los métodos húmedo, *honey* y seco determinan características fisicoquímicas y sensoriales del café (Heredia Castillo & Pérez Mera, 2024). El beneficiado húmedo implica fermentación en agua tras eliminar la pulpa; el método *honey* conserva el mucílago y se fermenta mientras se seca al sol, y el método seco fermenta el fruto completo sin lavado (Osorio et al., 2024). Cada técnica impacta en el desarrollo de compuestos aromáticos y permite ajustar el perfil según recursos e infraestructura (Pereira et al., 2020). Entre estos, el beneficiado húmedo con fermentación ha cobrado especial relevancia por su efecto directo sobre el perfil sensorial de la bebida (Pereira et al., 2020).

La fermentación es una fase clave del beneficiado del café, con influencia directa en la calidad del grano

(Juárez González et al., 2021). Es un proceso multifactorial y debe considerarse una etapa independiente dentro del procesamiento del café (Carvalho Ferreira et al., 2023). Durante esta, el mucílago se degrada mediante la acción de levaduras (*Saccharomyces*, *Torulopsis*, *Candida* y *Rhodotorula*) y bacterias lácticas (*Lactobacillus* y *Streptococcus*). Estos microorganismos generan metabolitos como ácidos, alcoholes y ésteres que modifican el pH, el aroma y el sabor (Carvalho Ferreira et al., 2023; Cruz-O'Byrne et al., 2021; Prado Martin & Dea Lindner, 2022).

El tiempo de fermentación depende del tipo de procesamiento, los microorganismos presentes, la composición de la cereza, el mucílago, la temperatura y otros factores ambientales (Apraez Muñoz et al., 2024; Juárez González et al., 2021). La influencia del oxígeno modifica el pH, la acidez, el olor y la composición química (Osorio Pérez et al., 2023). El tiempo de fermentación está condicionado por variables como el procesamiento, los microorganismos presentes y la temperatura (Sánchez Hernández, 2023).

Estudios recientes han buscado optimizar la calidad del café mediante el control de variables como el tipo de fermentación (aeróbica o anaeróbica), la inoculación microbiana y el método de beneficiado (Apraez Muñoz et al., 2024). Estas prácticas influyen en el pH, el perfil sensorial y la puntuación en taza (Pereira et al., 2022). Las fermentaciones controladas, especialmente en cafés lavados, han mejorado significativamente la calidad organoléptica (Morales-Reyes et al., 2024). No obstante, los métodos *honey* y natural también ofrecen buenos resultados y son opciones viables en regiones con escasez de agua (Álvarez López et al., 2024; Encalada Ramírez, 2024; Escalante Ñahui, 2023; Heredia Castillo & Pérez Mera, 2024; Jiménez Aldaz, 2024; Morales-Reyes et al., 2024).

En México, la investigación sobre biotecnología del café es limitada (Ozuna et al., 2020). En la región de Coatepec, Veracruz, la mayoría de los productores pequeños emplean técnicas tradicionales no estandarizadas y determinan el tiempo de fermentación mediante criterios empíricos, como el tacto o el sonido de los granos (Morales-Reyes et al., 2024). Estas prácticas, fundamentadas en la experiencia y no en parámetros técnicos, dificultan el control del proceso y propician errores de fermentación que afectan negativamente la calidad física y sensorial del grano, lo que disminuye su calidad y valor comercial (Osorio Pérez, 2021).

Cuando la fermentación se realiza de forma artesanal, no se desarrolla en entornos controlados, lo cual impide medir o supervisar variables críticas (Puerta Quintero, 2024). En consecuencia, la calidad final no es predecible y cada fermentación resulta diferente, sin posibilidad de garantizar la repetibilidad (Osorio et al., 2024). Medir y controlar este proceso representa un desafío técnico, ya que existe el riesgo de sobrefermentación, asociado al desarrollo de microorganismos no deseados que alteran negativamente el aroma y el sabor del café (Osorio Pérez, 2021). Por ello, aún es necesario profundizar en investigaciones que permitan administrar adecuadamente la fermentación y asegurar resultados consistentes (Puerta-Quintero, 2016).

Aunque se han desarrollado investigaciones enfocadas en el comportamiento de variables como pH, ácidos orgánicos y azúcares reductores durante la fermentación del café (Sánchez Hernández, 2023), en la región de Coatepec aún se evidencian procesos de beneficiado diversos, no caracterizados, y un conocimiento insuficiente sobre las variables críticas que inciden en la calidad del producto final. Factores como la temperatura, la calidad del agua, la madurez de la cereza y el tiempo de fermentación no son sistemáticamente controlados. La falta de estandarización limita la posibilidad de mejorar la competitividad del productor y su inserción estable en mercados especializados; además, produce lotes de baja calidad y aumenta los costos de producción (Córdoba-Castro & Guerrero-Fajardo, 2016; Pereira et al., 2022).

En concordancia con lo anterior, el objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia de dos métodos de fermentación (aeróbica y anaeróbica) sobre la calidad física y sensorial de una mezcla de café *Coffea arabica* L. (variedades Caturra, Mundo Nuevo, Costa Rica y Geisha), cultivada en la región de Coatepec, Veracruz, México, procesada mediante beneficiado húmedo.

Materiales y métodos

El estudio experimental se realizó durante la cosecha de 2025 (enero-marzo) en la Finca Bímori, ubicada en la región cafetalera de Coatepec, Veracruz, México, a una altitud de 1555 m s. n. m., en las coordenadas 19°28'43"N y 96°59'39"O. La finca se localiza en un sitio con características de bosque de niebla, entre la Sierra Madre Oriental, el Eje Volcánico Transversal y la Sierra Madre del Sur (Domínguez Valencia, 2022).

Las variedades de *Coffea arabica* L. utilizadas fueron Costa Rica, Caturra, Mundo Nuevo y Geisha, en proporciones 1:1:1:0,5, respectivamente, provenientes de plantaciones con más de diez años. La recolección del fruto se realizó de forma manual. Por razones logísticas y de seguridad, el estudio comenzó con café despulpado, por lo que no fue posible evaluar las etapas anteriores. La investigación se planteó como un estudio de caso en una finca específica; por ello, el diseño experimental se enfocó en evaluar métodos de fermentación sobre una mezcla varietal representativa del sistema productivo, y no en la comparación entre variedades.

Recolección de datos

El agua utilizada se caracterizó mediante el análisis de carbono orgánico total (COT), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos disueltos totales (TDS), alcalinidad total (AT), nitrógeno en forma de nitratos y nitritos (N-NO_3^- y N-NO_2^-), y cloro residual, todos expresados en mg/L. Además, se midieron la conductividad eléctrica (CE), expresada en $\mu\text{S/cm}$, y el pH. La fermentación se realizó en recipientes de polietileno de 60 L con salidas laterales para la toma de muestras. Se utilizó una cantidad de agua equivalente al 30 % del peso del café despulpado.

Se aplicaron dos métodos de fermentación diferenciados. En el primero, fermentación aeróbica (FAER), los recipientes permanecieron abiertos para permitir la entrada de oxígeno al sistema y provocar la oxidación de los compuestos formados durante la fermentación. En el segundo, fermentación anaeróbica (FANA), los recipientes fueron cerrados herméticamente (Figura 1). El proceso finalizó cuando el pH descendió hasta los $4,3 \pm 0,1$.

Se empleó un diseño completamente aleatorizado (DCA), con dos tratamientos y tres réplicas, para un total de seis unidades experimentales. Durante la fermentación se registraron mediciones directas en intervalos de 2 a 3 h. Las variables cuantificadas fueron los porcentajes de los sólidos solubles ($^\circ\text{Brix}$), la temperatura ($^\circ\text{C}$), el pH, la conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$) y los sólidos disueltos totales (mg/L). También se calcularon la variación de la demanda química de oxígeno y el carbono orgánico total, ambos expresados en mg/L, a lo largo del tiempo.

Los sólidos solubles se midieron con un refractómetro Abe (modelo Brix, rango de 0 a 32 $^\circ\text{Brix}$), mientras las variables pH, EC y TDS se determinaron con el equipo multitest (error de $\pm 0,05$ unidades). Además, se cuantificaron cloro total, nitratos y nitritos (mg/L) a través de tiras reactivas (caducidad: 28-11-2025). En el lavado del café se utilizó un volumen de 1,7 L de agua por kg de café y el método de los cuatro lavados (Peñuela & Sanz-Uribe, 2021). Finalmente, los granos se colocaron en zaranda para su secado solar.

Calidad física y sensorial del café

Se tomaron cinco muestras de 400 a 500 g para la evaluación de su calidad física. En el café pergamino seco (CPS) se determinaron la humedad (%) y la densidad del grano (g/L) con un equipo multiparamétrico (rango de 0,2-40 %, error de $\pm 0,5$ %). Los granos de café verde se obtuvieron después del trillado del café pergamino seco. Posteriormente, se retiraron los defectos físicos y las impurezas del grano, y se determinaron el rendimiento (ecuación 1), la humedad (%) y la densidad (g/L). La diferencia entre las muestras de CPS y café verde radicó en el pergamino, el cual corresponde a la cubierta o revestimiento que presenta el café una vez seco. Para tostar, moler y preparar la bebida, este debe eliminarse (Peñuela & Sanz-Uribe, 2021).

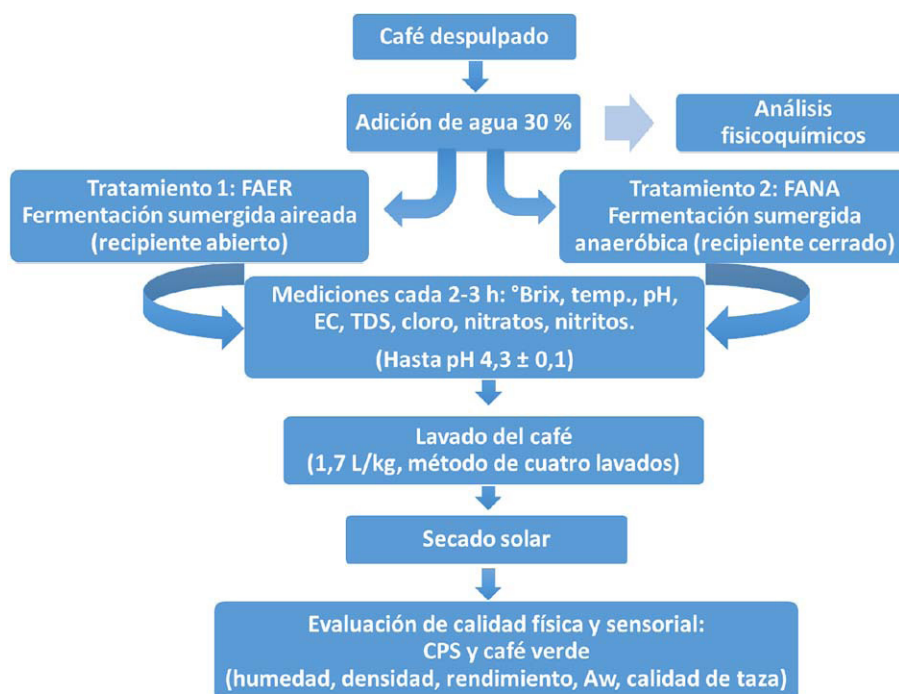


Figura 1. Diagrama del proceso de fermentación y evaluación de calidad del café. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

FAER: Fermentación recipiente aireado. **FANA:** Fermentación anaeróbica. **Temp.:** temperatura. **EC:** Conductividad eléctrica. **TDS:** Sólidos disueltos totales. **CPS:** Café pergamino seco, **Aw:** Actividad de agua

Figure 1. Flow diagram of the coffee fermentation process and quality evaluation. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

FAER: Aerated container fermentation. **FANA:** Anaerobic fermentation. **Temp.:** temperature. **EC:** Electrical conductivity. **TDS:** Total dissolved solids. **CPS:** Dry parchment coffee, **Aw:** water activity

$$\% \text{ rendimiento} = \frac{\text{Peso (café verde)}}{\text{Peso (CPS)}} * 100 \quad (1)$$

La actividad de agua se estimó a partir de la ecuación 2 (Osorio et al., 2024), tanto para CPS como para café verde.

$$Aw = 0,178202 + 0,03953 * H \quad (2)$$

Donde:

Aw: Actividad de agua.

H: Porcentaje de humedad del café.

Al café verde obtenido se le realizaron pruebas de calidad de taza a través del procedimiento de la Specialty Coffee Association of America (SCAA) (Mare Terra Coffee, 2023). Con esta metodología se registraron diez atributos del sabor del café: fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad, taza

limpia, dulzor y puntaje del catador. La puntuación final fue calculada por la suma de todos los atributos (Mare Terra Coffee, 2023). La cata la realizaron trabajadores del Museo Finca Roma, quienes son catadores del café Bola de Oro, ganadores de múltiples premios de calidad.

Análisis estadístico de los datos

Los datos fueron procesados mediante el programa informático SPSS versión 25. Para cada variable evaluada se calcularon medidas de tendencia central y de dispersión (promedios, valores máximos, mínimos y desviaciones estándar). Se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, los cuales se cumplieron en todos los casos. Por ello, se aplicaron pruebas paramétricas (*t* de Student para muestras independientes y pareadas, correlaciones de Pearson). Se utilizó un análisis de varianza multivariado (MANOVA) para determinar el efecto de los tratamientos sobre las variables dependientes, con el fin de identificar diferencias significativas en el conjunto de variables fisicoquímicas según el tipo de fermentación, con un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0,05$).

Resultados

Caracterización del agua como materia prima

El análisis del agua utilizada para el beneficiado húmedo reveló que los parámetros fisicoquímicos presentaron poca variabilidad entre las réplicas. El agua se caracterizó por estar clorada y mantener un pH neutro. Asimismo, las concentraciones de nitrito, nitrato, DQO y COT fueron homogéneas entre las muestras analizadas. La mayor variabilidad se observó en la variable EC. En todos los casos, los errores estándar fueron bajos o nulos (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características de las aguas para beneficiar el café. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

Table 1. Characteristics of the water used for coffee processing. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

Indicadores	N	Media	EE	Mínimo	Máximo
COT (mg/L)	18	1,8	0,02	1,7	1,9
DQO (mg/L)	18	2,5	0,1	2,3	2,8
TDS (mg/L)	18	52,3	1,5	41,0	62,0
AT (mg/L)	18	61,9	0,9	51,0	68,0
pH	18	6,8	0,0	6,8	6,8
CE (μ S/cm)	18	104,4	3,1	81,0	122,0
N-NO ₂ ⁻ (mg/L)	18	0,8	0,0	0,8	0,8
N-NO ₃ ⁻ (mg/L)	18	10,0	0,0	10,0	10,0
Cloro residual (mg/L)	18	1,0	0,0	1,0	1,0

N: Número de datos. **EE:** Error estándar. **COT:** Carbono orgánico total. **DQO:** Demanda química de oxígeno. **TDS:** Sólidos disueltos totales. **AT:** Alcalinidad total. **CE:** Conductividad eléctrica. **N-NO₂⁻:** Nitrógeno en forma de nitritos. **N-NO₃⁻:** Nitrógeno en forma de nitratos. / **N:** Number of data. **EE:** Standard error. **COT:** Total organic carbon. **DQO:** Chemical oxygen demand. **TDS:** Total dissolved solids. **AT:** Total alkalinity. **CE:** Electrical conductivity. **N-NO₂⁻:** Nitrite nitrogen. **N-NO₃⁻:** Nitrate nitrogen.

Fermentación en el tiempo

La temperatura presentó un comportamiento variable durante la fermentación, con valores entre 19 y 24 °C. A medida que avanzó el proceso, la fermentación aeróbica registró valores ligeramente superiores en comparación con la anaeróbica (Figura 2); sin embargo, las diferencias no fueron estadísticamente significativas ($p = 0,503$). Se identificaron correlaciones negativas significativas entre las variables temperatura y tiempo de fermentación ($p = 0,013$; $r = -0,57$).

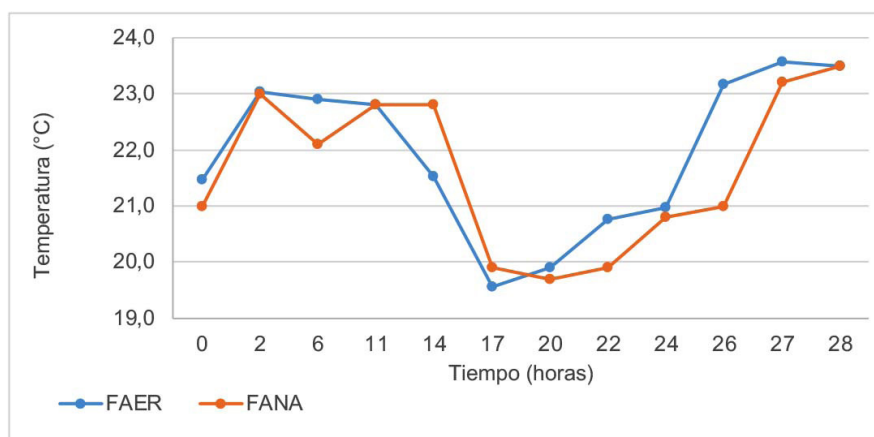


Figura 2. Variación de temperatura durante el tiempo de fermentación de la mezcla de granos de café. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

FAER: Fermentación recipiente aireado. **FANA:** Fermentación anaeróbica.

Figure 2. Temperature variation during the fermentation time of the coffee bean mixture. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

FAER: Aerated container fermentation. **FANA:** Anaerobic fermentation.

Durante el tiempo de fermentación, hubo variación significativa del pH y de los sólidos solubles ($p < 0,01$) en ambos experimentos. La variante FAER presentó mayor concentración de sólidos solubles durante todas las mediciones; sin embargo, esta diferencia no fue significativa ($p = 0,386$). En cuanto al pH, ambos experimentos tuvieron un comportamiento semejante, sin diferencias entre sus mediciones ($p = 0,202$) (Figura 3).

Las variables TDS y EC aumentaron significativamente durante el tiempo de fermentación ($p < 0,01$). El café fermentado en condiciones aeróbicas inició con valores superiores; no obstante, con el tiempo las mediciones fueron estadísticamente equivalentes ($p > 0,05$) en ambas variables. Se observó una correlación positiva y significativa entre estas ($p < 0,01$; $r > 0,96$) (Figura 4).

Las variaciones de nitratos y cloro total durante las 28 h de fermentación se cuantificaron solo en la variante aeróbica (Figura 5). Al inicio, las concentraciones de ambas poseían valores iguales al del agua utilizada; sin embargo, al transcurrir las primeras horas de fermentación tuvieron un aumento significativo ($p < 0,01$). A partir de 14 h, los nitratos comenzaron a descender hasta los 5 mg/L, mientras que el cloro total disminuyó hasta 1 mg/L, aunque, después de 22 h comenzó a ascender hasta los 2 mg/L.

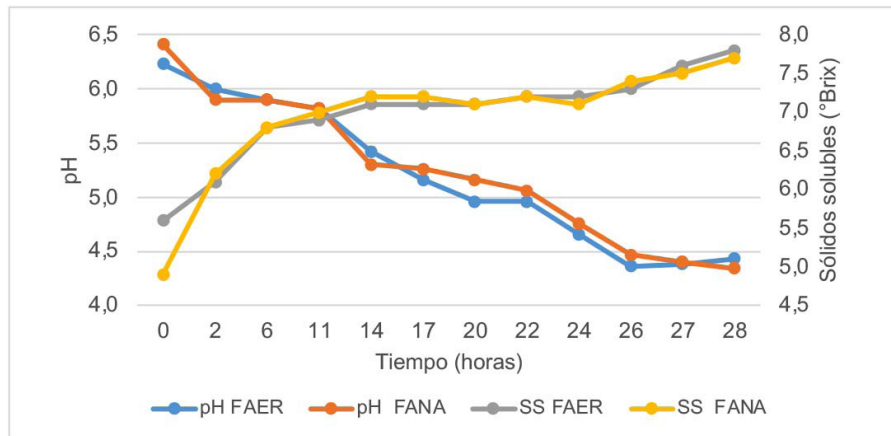


Figura 3. Variación del pH y sólidos solubles durante el tiempo de fermentación de la mezcla de granos de café. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

FAER: Fermentación recipiente aireado. **FANA:** Fermentación anaeróbica. **SS:** Sólidos solubles expresados en °Brix.

Figure 3. Variation of pH and soluble solids during the fermentation time of the coffee bean mixture. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

FAER: Aerated container fermentation. **FANA:** Anaerobic fermentation. **SS:** Soluble solids expressed in °Brix.

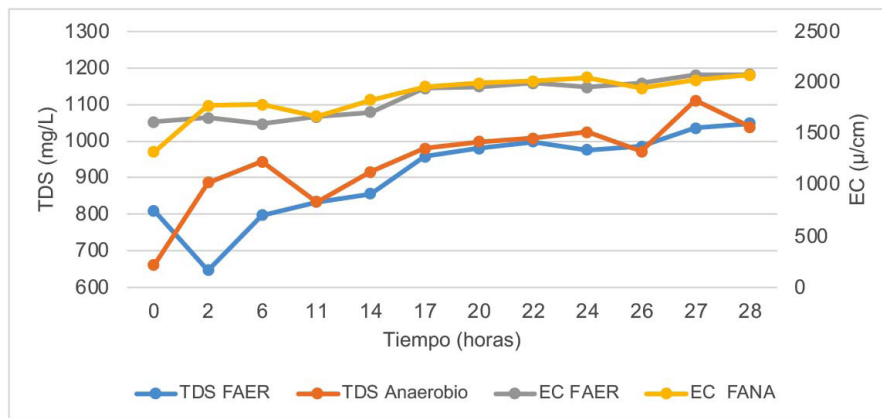


Figura 4. Variación de sólidos disueltos totales (TDS) y la conductividad eléctrica (EC) durante el tiempo de fermentación de la mezcla de granos de café. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

FAER: Fermentación recipiente aireado. **FANA:** Fermentación anaeróbica.

Figure 4. Variation of total dissolved solids (TDS) and electrical conductivity (EC) during the fermentation time of the coffee bean mixture. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

FAER: Aerated container fermentation. **FANA:** Anaerobic fermentation.

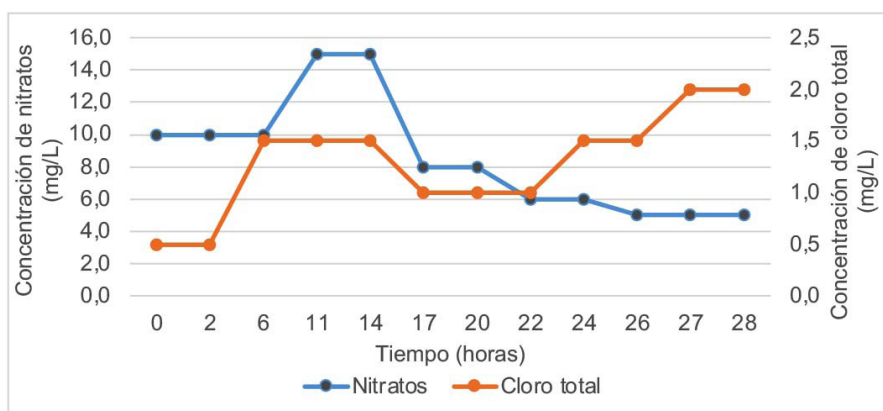


Figura 5. Variación de las concentraciones de nitratos y cloro total en el transcurso del tiempo de fermentación de mezclas de granos de café. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

Figure 5. Variation of nitrate and total chlorine concentrations during the fermentation time of coffee bean mixtures. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

Durante la fermentación se registraron incrementos significativos ($p < 0,05$) en las concentraciones de carbono orgánico total y demanda química de oxígeno. El COT se incrementó de 185,9 mg/L a 3793,9 mg/L al final del periodo y el DQO de 237,2 mg/L a 5465,2 mg/L. A partir de las 20 h se observaron aumentos sostenidos en ambos parámetros con menor variabilidad (Figura 6). Se identificó correlación positiva y significativa ($p < 0,01$; $r > 0,97$) entre las variables tiempo de fermentación, DQO y COT.

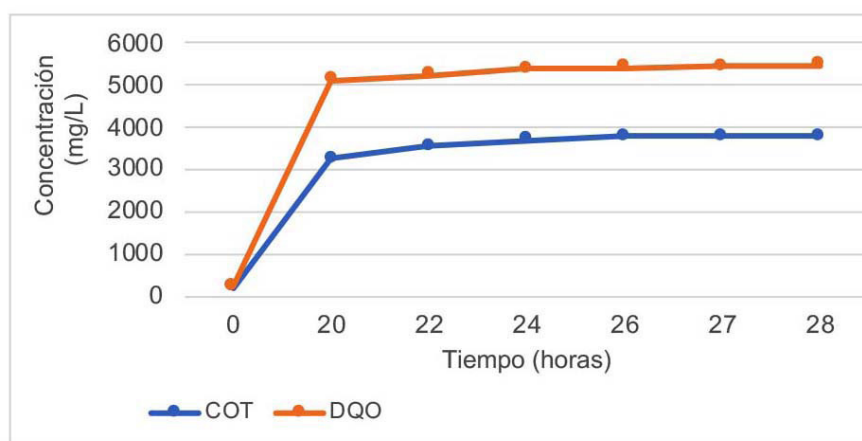


Figura 6. Variación de las concentraciones de carbono orgánico total (COT) y demanda química de oxígeno (DQO) en el transcurso del tiempo de fermentación de la mezcla de granos de café. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

Figure 6. Variation of total organic carbon (TOC) and chemical oxygen demand (COD) concentrations during the fermentation time of the coffee bean mixture. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

El análisis estadístico no identificó efectos significativos del tipo de fermentación sobre las variables fisicoquímicas evaluadas ($p > 0,05$). Las pruebas multivariadas (traza de Pillai y lambda de Wilks) indicaron la ausencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Cuadro 2). En consecuencia, no se aplicaron pruebas univariadas (ANOVA), ya que la falta de diferencias significativas globales ($p > 0,05$) en el enfoque multivariado indicó que los tratamientos no provocaron efectos significativos individuales sobre las variables analizadas.

Cuadro 2. Resultados de las pruebas multivariadas para el efecto del tipo de fermentación en las variables de control del proceso. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

Table 2. Results of multivariate tests for the effect of fermentation type on process control variables. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

		Valor	F	gl ₁	gl ₂	P
Tipo de fermentación	Traza de Pillai	0,689	0,475	14	3	0,854
	Lambda de Wilks	0,311	0,475	14	3	0,854

No se observaron efectos significativos ($p > 0,05$). **gl₁**: Grados de libertad del modelo. **gl₂**: Grados de libertad del error. / No significant effects were observed ($p > 0,05$). **gl₁**: Degrees of freedom of the model. **gl₂**: Degrees of freedom of the error.

Calidad física y sensorial del café

Los resultados del análisis multivariado aplicado a las variables físicas del café (humedad del pergamino seco, humedad del café verde, densidad del pergamino, densidad del café verde, rendimiento y actividad de agua) se muestran en el Cuadro 3. Las pruebas de traza de Pillai y lambda de Wilks no indicaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$). La ausencia de diferencias significativas globales ($p = 0,484$) en el enfoque multivariado indicó que los tipos de fermentación no generaron efectos significativos individuales sobre las variables de calidad física rendimiento, humedad, densidad y actividad de agua ($p > 0,05$).

Cuadro 3. Resultados de las pruebas multivariadas (MANOVA) para evaluar el efecto del tipo de fermentación sobre las variables de calidad física. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

Table 3. Results of multivariate tests (MANOVA) to evaluate the effect of fermentation type on physical quality variables. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

		Test	Valor	F	gl ₁	gl ₂	P
Tipo de fermentación	Traza de Pillai		0,411	0,998	7	10	0,484
	Lambda de Wilks		0,589	0,998	7	10	0,484

No se observaron efectos significativos ($p > 0,05$). **gl₁**: Grados de libertad del modelo. **gl₂**: Grados de libertad del error. / No significant effects were observed ($p > 0,05$). **gl₁**: Degrees of freedom of the model. **gl₂**: Degrees of freedom of the error.

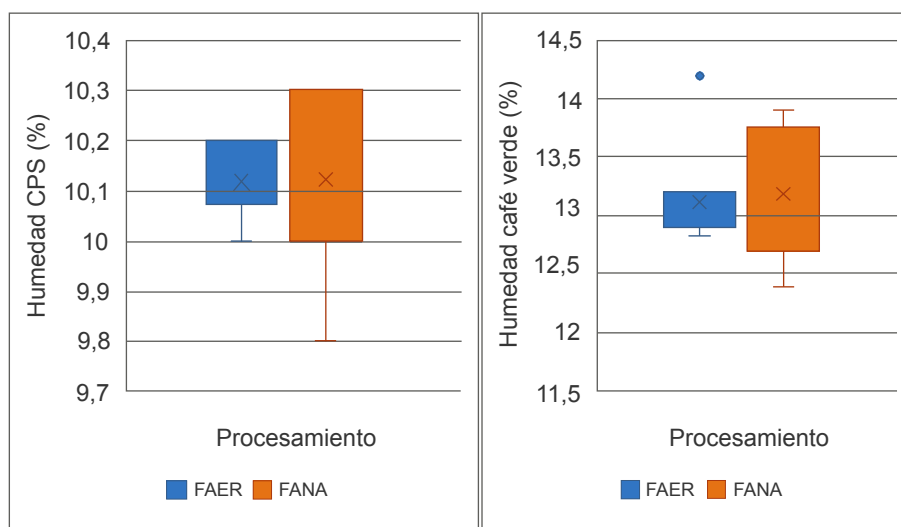


Figura 7. Contenido de humedad (%) en café pergamino seco (CPS) y café verde tras fermentación aeróbica y anaeróbica. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

FAER: Fermentación recipiente aireado. **FANA:** Fermentación anaeróbica.

Figure 7. Moisture content (%) in dry parchment coffee (CPS) and green coffee after aerobic and anaerobic fermentation. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

FAER: Aerated container fermentation. **FANA:** Anaerobic fermentation.

Los valores de humedad para el café en pergamino seco y café verde, obtenidos mediante fermentación aeróbica y anaeróbica, se muestran en la Figura 7. La humedad en el CPS se mantuvo en un rango similar en ambos tratamientos ($p = 0,930$), con valores cercanos al 10 %. En el café verde, en ambos tratamientos se observó un aumento significativo ($p < 0,01$) de la humedad respecto al CPS, con valores próximos al 13 %.

Los resultados de la actividad de agua y la densidad en café pergamino seco y café verde, procesados mediante FAER y FANA, se presentan en el Cuadro 4. La A_w fue significativamente mayor en el café verde que en el pergamino seco en ambos tratamientos ($p < 0,01$). No se observaron diferencias significativas entre los métodos de

Cuadro 4. Actividad de agua y densidad del café procesado como pergamino seco o café verde, según el tipo de fermentación. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

Table 4. Water activity and density of coffee processed as dry parchment or green coffee, according to fermentation type. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

Tipo de fermentación	Aw		Densidad (g/L)	
	CPS	Café verde	CPS	Café verde
Aeróbica	$(57,8 \pm 0,3) \times 10^{-2}^a$	$(69,7 \pm 1,7) \times 10^{-2}^b$	$454,0 \pm 16,1^a$	$762,0 \pm 35,2^b$
Anaeróbica	$(57,8 \pm 0,6) \times 10^{-2}^a$	$(69,9 \pm 2,3) \times 10^{-2}^b$	$469,0 \pm 25,8^a$	$786,0 \pm 39,4^b$

Aw: Actividad de agua. **CPS:** Café pergamino seco. Letras diferentes (a y b) corresponden a diferencias significativas ($p < 0,05$). / **Aw:** Water activity. **CPS:** Dry parchment coffee. Different letters (a and b) indicate significant differences ($p < 0.05$).

FAER y FANA respecto a la A_w ($p = 0,778$). La densidad del CPS fue similar entre ambos tratamientos, aunque el valor fue ligeramente superior en FANA, sin diferencia significativa ($p = 0,160$). En café verde, las densidades fueron mayores que en el pergamino seco ($p < 0,01$), y el valor máximo fue alcanzado en el tratamiento FANA (Cuadro 4).

El rendimiento mostró una tendencia a ser mayor bajo condiciones anaeróbicas; sin embargo, las diferencias no fueron significativas ($p = 0,900$). En la fermentación aeróbica, esta variable presentó dispersión superior entre réplicas. El valor más alto se registró en el tratamiento anaeróbico (Figura 8).

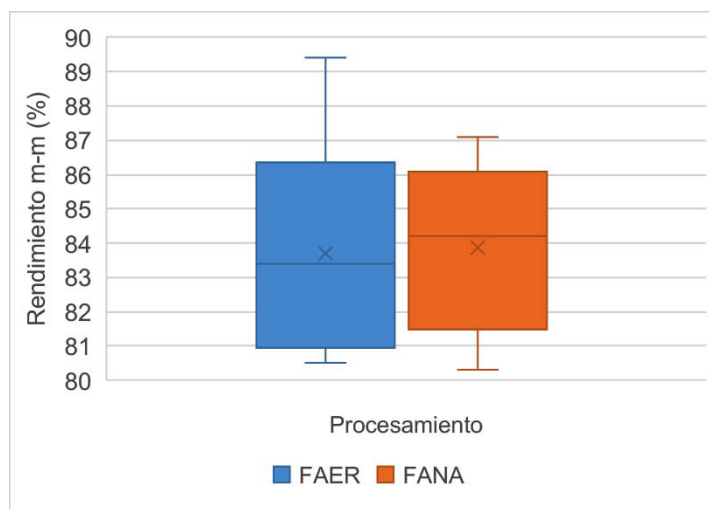


Figura 8. Rendimiento del café. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

FAER: Fermentación recipiente aireado. **FANA:** Fermentación anaeróbica.

Figure 8. Coffee yield. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

FAER: Aerated container fermentation. **FANA:** Anaerobic fermentation.

El café fermentado por el método anaeróbico obtuvo puntuaciones más altas que el aeróbico en los atributos de fragancia/aroma, balance y puntaje total. Este café presentó un perfil sensorial más complejo, con notas cítricas, toques de hierbabuena y ligeras notas florales, mientras que el café fermentado mediante el método aeróbico mostró un perfil más tradicional, con notas dulces como caramelo y chocolate. Ambos métodos alcanzaron los puntajes máximos en uniformidad y dulzor, y registraron valores similares en acidez y taza limpia (Cuadro 5). Estas diferencias sensoriales fueron significativas ($p < 0,01$) entre los métodos de fermentación. Ambos cafés fueron clasificados como de especialidad.

Cuadro 5. Resultados de la evaluación sensorial del café con fermentación aeróbica y anaeróbica según los atributos de la Specialty Coffee Association of America. Finca Bímori, Coatepec, México. Enero a marzo de 2025.

Table 5. Sensory evaluation results of coffee from aerobic and anaerobic fermentation based on the attributes of the Specialty Coffee Association of America. Bímori farm, Coatepec, Mexico. January to March 2025.

Atributos	Aeróbica	Anaeróbica
Fragancia/aroma	7,1 ^a	7,8 ^b
Sabor	7,2 ^a	7,4 ^b
Sabor residual	7,5 ^a	7,4 ^a
Acidez	7,3 ^a	7,5 ^a
Cuerpo	7,8 ^a	7,7 ^a
Balance	7,4 ^a	8,1 ^b
Uniformidad	10,0 ^a	10,0 ^a
Taza limpia	9,5 ^a	9,3 ^a
Dulzor	10,0 ^a	10,0 ^a
Puntaje catador	7,0 ^a	7,5 ^b
Puntaje total de la taza	80,8 ^a	82,7 ^b
Clasificación	Especialidad, muy bueno.	Especialidad, muy bueno.
Notas sensoriales	Notas caramelo, chocolate.	Notas cítricas, notas a hierbabuena y pequeñas notas florales.

Las letras *a* y *b* dentro de la misma fila indicaron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$). / Letters *a* and *b* within the same row indicate significant differences between treatments ($p < 0.05$).

Discusión

Los valores de TDS, pH, nitratos, nitritos y conductividad eléctrica se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-2021, que regula la calidad del agua para consumo humano (Secretaría de Salud, 2022). La DQO fue baja en comparación con el límite de 10 mg/L para aguas de excelente calidad, lo que indicó una escasa presencia de materia orgánica biodegradable (Comisión Nacional del Agua, 2024). El cloro residual evidenció un proceso adecuado de desinfección y condiciones favorables desde el punto de vista microbiológico (Organización Mundial de la Salud, 2023). En conjunto, los parámetros confirmaron que el agua era apta para consumo humano y apropiada para el beneficiado del café (Puerta Quintero & Echeverry Molina, 2015).

El tiempo de fermentación se logró a las 28 h, con temperaturas entre 20 y 23 °C, en concordancia con lo reportado por Puerta Quintero y Echeverry Molina (2015), quienes plantearon que en las fermentaciones sumergidas a las mismas temperaturas se podría fijar un tiempo entre 18 y 30 h. Aunque no hubo diferencias estadísticas en la temperatura, la variación pudo llegar a afectar el proceso, por lo cual se estableció un monitoreo constante (Álvarez López et al., 2024). La variación de la temperatura interna de la masa en diferentes momentos del proceso de fermentación en ambos tratamientos se atribuyó a que las reacciones bioquímicas que se realizaron fueron exotérmicas (Cruz-O'Byrne et al., 2021).

Las condiciones de temperatura resultaron determinantes para mantener la viabilidad de los microorganismos (principalmente flora de los mesófilos) y como catalizador de las reacciones enzimáticas de la fermentación (Córdoba-Castro & Guerrero-Fajardo, 2016; Pereira et al., 2022). El análisis estadístico reveló una correlación negativa entre tiempo y temperatura. Un aumento de la temperatura reduce el tiempo de fermentación (Puerta Quintero & Echeverry Molina, 2015), mientras que, una disminución de ella, lo incrementa. Por esta razón, en esta investigación el control del pH se estableció como variable para detener la fermentación.

Los valores promedio de pH inicial para los tratamientos aeróbico (6,13) y anaeróbico (6,1) fueron superiores a los reportados por Córdoba-Castro y Guerrero-Fajardo (2016). Estas diferencias se asociaron al estado de madurez, las variedades cultivadas, las condiciones agroclimáticas y el tiempo entre la recolección y el despulpado (Puerta Quintero & Echeverry Molina, 2015). El pH final puede ser utilizado como indicador para finalizar el proceso de fermentación en el tiempo adecuado y evitar los problemas de sobrefermentación del grano (Silva et al., 2024). Los valores obtenidos en ambos tratamientos coincidieron con Córdoba-Castro y Guerrero-Fajardo (2016).

La tendencia descendente del pH durante la fermentación respondió a un aumento de la acidez de la masa, que coincide con la producción de ácidos a partir de los azúcares y con el rompimiento de las pectinas en el mucílago de café (Prado Martin & Dea Lindner, 2022). Esta propensión coincidió con el aumento de los sólidos solubles del mosto en ambos tratamientos. En sistemas sumergidos, los sólidos solubles del medio aumentan debido a la disolución de las sustancias orgánicas en agua. Al inicio, cuando se incorporó el 30 % de agua, el valor de los sólidos fue alrededor de 4,2 %, y finalizaron con 5,8 a 7,8 en sistemas abiertos y 5,9 a 8 en sistemas cerrados (Puerta Quintero & Echeverry Molina, 2015).

Durante la fermentación del café, los valores de TDS, COT y DQO aumentaron significativamente por la liberación de compuestos orgánicos solubles y oxidables, producto de la descomposición de las pectinas del mucílago por acción microbiana (Puerta Quintero & Echeverry Molina, 2015). Con el avance del proceso, se solubilizaron y liberaron metabolitos como ácidos orgánicos, etanol y sales minerales (Silva et al., 2024; Tan et al., 2023). Además, la acidificación del medio produjo cargas positivas, lo que incrementó la concentración de iones en el mosto y, en consecuencia, elevó los valores de EC (Holguín-Sterling et al., 2023; Puerta-Quintero, 2022).

En las primeras horas de fermentación, los niveles de nitrato en el mosto aumentaron por la liberación de compuestos nitrogenados del mucílago y su transformación en nitrato por acción microbiana (Holguín-Sterling et al., 2023). Con el transcurso del tiempo, este disminuyó al ser utilizado por los microorganismos como fuente de nitrógeno o reducido a formas menores mediante desnitrificación (Tan et al., 2023). A su vez, los niveles de cloro total aumentaron debido a la liberación de iones cloruro del mucílago y la concentración de sales solubles por la actividad metabólica de los microorganismos presentes, lo que coincide con los resultados de otros estudios sobre la dinámica de nutrientes en la fermentación del café (Silva et al., 2024).

El contenido de humedad del café seco, la humedad relativa ambiental, la Aw y la temperatura determinan el tiempo de almacenamiento del café pergamino seco y del café verde (Gallego et al., 2023). La actividad de agua se relaciona estrechamente con el contenido de humedad del grano y constituye un parámetro fundamental para la conservación de la estabilidad química del café (Osorio et al., 2024). Los granos con contenidos de humedad inferiores al 13 % pueden ser susceptibles al ataque de microorganismos (Osorio Pérez, 2021, Secretaría de Salud, 2022), lo cual afecta su tiempo de vida en almacenamiento.

Las diferencias de humedad entre CPS y el café verde fueron 3,1 y 3,2 % para fermentación aeróbica y anaeróbica, respectivamente, valores superiores a los reportados por Osorio et al. (2022). Estas diferencias se atribuyeron a los compuestos de la pulpa de café asociados a las variedades y los estados de maduración de las cerezas (Rodríguez Frómata et al., 2020). En la literatura científica, los valores de humedad variaron entre los 8,5 % y 12,8 % en CPS (Apraez Muñoz et al., 2024; Escalante Ñahui, 2023; Heredia Castillo & Pérez Mera, 2024; Juárez González et al., 2021; Meza Calixto, 2019; Osorio et al., 2022), mientras que en este estudio se obtuvieron valores entre los 9,8-10,3 %. Estas diferencias estuvieron influenciadas por la temperatura ambiental, la circulación de aire, la humedad relativa y la altitud, entre otros factores (Osorio Pérez, 2021).

Para evitar la proliferación de microorganismos indeseables, la A_w debe mantenerse en un rango entre 0,65 y 0,7 (Morales Reyes & Bolaños González, s. f.). Las ocratoxinas, un tipo de micotoxinas producidas por mohos de los géneros *Aspergillus* y *Penicillium*, pueden desarrollarse cuando superan el valor 0,7 (Osorio et al., 2024; Puerta-Quintero, 2016). En este estudio, los valores de A_w del CPS estuvieron por debajo del valor umbral, mientras que en el café verde se encontraron muy próximos al límite de seguridad.

Las densidades de los granos en ambos casos superaron los valores reportados por Juárez González et al. (2021) para cafés fermentados, y fueron similares a los de Escalante Ñahui (2023). Estas variaciones estuvieron asociadas a la altura, la composición, la temperatura, la nutrición de la planta, el manejo del cultivo y las variedades cosechadas (Morales Reyes & Bolaños González, s. f.). Los granos con una densidad mayor a 650 g/L fueron considerados de alta densidad, asociados a un proceso de maduración más lento y uniforme y con una mayor acumulación de importantes precursores de aroma y sabor del café. Una menor densidad en cambio se relaciona con diferentes defectos como granos rotos, malformados, huecos, fermentados, atacados por plagas y presencia de cáscaras (Juárez González et al., 2021).

Las diferencias observadas entre el CPS y el café verde se relacionaron con la presencia del pergamino, el cual aporta mayor volumen y menor peso al grano. Esta capa externa funcionó como una barrera natural que protegió al grano frente a factores ambientales, lo que facilitó su conservación durante periodos prolongados sin comprometer la calidad (Mendoza Marcillo et al., 2023). Además, el café mostró un comportamiento higroscópico y el pergamino contribuyó a reducir la absorción o pérdida de humedad, lo que mantuvo sus atributos sensoriales durante el almacenamiento (Osorio et al., 2024). Por este motivo, no se recomienda almacenar café verde (Puerta-Quintero, 2022).

Las diferencias de los rendimientos respecto a otros estudios pueden explicarse por varios factores. El hecho de no clasificar el café por mallas pudo haber contribuido a obtener valores mayores, ya que esta práctica suele eliminar granos de menor calibre. El manejo de los cultivos, el control de plagas, las condiciones geográficas de la región, como la altitud y las temperaturas, y la selección cuidadosa de cerezas maduras durante la cosecha pudieron haber favorecido una mayor eficiencia en la conversión de pergamino a café oro. Los valores obtenidos se ubicaron dentro del intervalo óptimo de 76 % a 83 % (Escalante Ñahui, 2023; Jiménez Aldaz, 2024; Meza Calixto, 2019; Puerta-Quintero, 2016).

La ausencia de diferencias significativas entre fermentación aeróbica y anaeróbica en todas las variables químicas (pH, TDS, EC, sólidos solubles, temperatura) respondió, en gran medida, a que ambos tratamientos compartieron tiempo de contacto, temperatura y concentración inicial de sustratos. Estas condiciones homogéneas permitieron que la microbiota heterótrofa siguiera rutas metabólicas similares, de modo que la vía glicolítica y la liberación de compuestos solubles ocurrieron con igual intensidad en ambos sistemas (Apraez Muñoz et al., 2024; Pereira et al., 2022). El oxígeno disponible en la fermentación aeróbica no actuó como un factor limitante ni potenciador para generar perfiles químicos distintos.

La calidad física del café no mostró relación con el tipo de fermentación, ya que los atributos medidos (humedad, A_w y rendimiento) dependían principalmente de procesos posteriores, como el secado y la manipulación mecánica (Jiménez Aldaz, 2024). La humedad y la A_w se estabilizan por ósmosis y su evolución responde a condiciones ambientales externas (Gallego et al., 2023), mientras el rendimiento está asociado a factores agronómicos y de manipulación (Escalante Ñahui, 2023). No se encontró correlación estadística entre estas variables y el tipo de fermentación, dado que cada parámetro sigue mecanismos independientes influenciados por factores ajenos al proceso fermentativo (Heredia Castillo & Pérez Mera, 2024).

Los resultados sensoriales obtenidos coincidieron con lo reportado por Jiménez Aldaz (2024), quien evaluó cafés Bourbon y Geisha procesados mediante fermentación aeróbica y anaeróbica y registró puntajes de taza de 81,5 y 82,5 puntos y de 83 y 84 puntos, respectivamente. Por su parte, Puerta Quintero y Echeverry Molina (2015) indicaron que, en fermentaciones realizadas entre 18 y 30 °C durante 24 a 30 h, los cafés sometidos a fermentación anaeróbica presentaron notas frutales, cítricas, florales y ligeramente achocolatadas, mientras que los procesados en sistemas aeróbicos mostraron descriptores como caramelo y chocolate. Las diferencias sensoriales se relacionaron con la producción diferenciada de compuestos volátiles durante la fermentación (Juárez González et al., 2021).

En condiciones anaeróbicas se favoreció el desarrollo de levaduras y bacterias ácido-lácticas, cuyas rutas metabólicas alteraron la composición química del grano (Lee et al., 2015; Pereira et al., 2022). La acumulación de ácidos orgánicos influyó en una mayor percepción de acidez (Apraez Muñoz et al., 2024; Silva et al., 2024). Por el contrario, la fermentación aeróbica, presentó menor generación de metabolitos diferenciadores y mantuvo perfiles sensoriales tradicionales (Álvarez López et al., 2024). Estas diferencias se explicaron por la diversidad de microorganismos y condiciones metabólicas, no por fallas en el proceso (De Bruyn et al., 2017; Tan et al., 2023).

Conclusiones

Los métodos de fermentación aeróbica y anaeróbica aplicados a la mezcla de café cultivada en la región de Coatepec, Veracruz, México, y procesada mediante beneficiado húmedo no ejercieron una influencia significativa sobre la calidad física del grano. En cuanto a la calidad sensorial, el método anaeróbico generó un perfil más complejo de sabores, con mayor diversidad aromática, mientras que la fermentación aeróbica conservó un perfil tradicional, caracterizado por notas dulces clásicas. Las aguas utilizadas durante el proceso de beneficiado presentaron características de excelente calidad, lo que garantizó condiciones adecuadas para la fermentación y el procesamiento del café.

Se recomienda estudiar la influencia de los compuestos nitrogenados y clorados formados durante la fermentación, así como su posible incidencia en la taza. Asimismo, sea cual sea el método de procesamiento, el café se debe conservar en pergamino y no en grano verde.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación por brindar sus recursos y confianza para el desarrollo de este proyecto, así como al Colegio de Veracruz por ofrecer un entorno académico enriquecedor y el acompañamiento necesario para avanzar en esta labor investigativa. También extienden su agradecimiento a doña Raquel, por permitirles realizar los estudios, y a los trabajadores del Museo Finca Roma, especialmente a Yulissa Rivas Hernández, Francisco de Jesús Mesa (Paco), María del Carmen Trujillo Hernández, Benjamín Cortes Tesón y Carlos Gerardo Quechuleño Cortes.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Álvarez López, B. A., Mastrocola Racines, N. A., Tello Hidalgo, E. G., & Torres Rodríguez, D. G. (2024). Influencia de las condiciones ambientales y tiempo de fermentación aerobia sobre la calidad del café (*Coffea arabica* L.) var. Catucaí. *Semiárida*, 34(2), 31-42. <https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/semiarida/article/view/8096>
- Apraez Muñoz, J. J., Solarte Guerrero, J. G., & Ceballos Freire, A. J. (2024). Determination of incident factors in the fermentation of the coffee bean, analyzing the post-harvest variables and addition of fermenting microorganisms, in the postharvest of the bean. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(3), Artículo e73258. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n3-120>

- Carvalho Ferreira, L. J., De Souza Gomes, M., Maciel de Oliveira, L., & Diniz Santos, L. (2023). Coffee fermentation process: a review. *Food Research International*, 169, Artículo 112793. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112793>
- Comisión Nacional del Agua. (2024, 9 de octubre). *Indicadores de calidad del agua*. Gobierno de México. Recuperado el 8 de enero de 2025 de <https://www.gob.mx/conagua/es/articulos/indicadores-de-calidad-del-agua?idiom=es>
- Córdoba-Castro, N. M., & Guerrero-Fajardo, J. E. (2016). Caracterización de los procesos tradicionales de fermentación de café en el departamento de Nariño. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 75-83. <http://www.scielo.org.co/pdf/bsaa/v14n2/v14n2a09.pdf>
- Cruz-O'Byrne, R., Piraneque-Gambasica, N., & Aguirre-Forero, S. (2021). Microbial diversity associated with spontaneous coffee bean fermentation process and specialty coffee production in northern Colombia. *International Journal of Food Microbiology*, 354, Artículo 109282. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2021.109282>
- De Bruyn, F., Zhang, S. J., Pothakos, V., Torres, J., Lambot, C., Moroni, A. V., Callanan, M., Sybesma, W., Weckx, S., & De Vuyst, L. (2017). Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(1), Artículo e02398-16. <https://doi.org/10.1128/AEM.02398-16>
- Domínguez Valencia, E. (2022). *Relevo generacional en el cafetal: por la permanencia de un cultivo tradicional. Estudio de caso de los productores del Consejo Regional del Café de Coatepec, Veracruz* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana]. Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma Metropolitana. <https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/26625>
- Encalada Ramírez, E. (2024). *Calidad sensorial del Coffea arabica variedad caturra influenciado por diferentes procesos y tiempos de fermentación en el distrito de Marías* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/2924>
- Escalante Ñahui, L. (2023). *Influencia de métodos de beneficio poscosecha en la calidad física y organoléptica de granos de café Catimor (Coffea arabica L.) VRAEM* [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga]. Repositorio de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/5506>
- Gallego, C. P., Imbachí, L. C., & Osorio, V. (2023). Influencia del proceso de secado del café natural en las características físicas del grano y la calidad sensorial. *Revista Cenicafé*, 74(1), Artículo e74107. <https://doi.org/10.38141/10778/74107>
- Heredia Castillo, B. A., & Pérez Mera, M. J. (2024). *Tiempos de fermentación sumergida, procesos de beneficio en cuatro variedades de café (Coffea arabica L.) y su influencia en calidad organoléptica - San Martín* [Tesis de grado, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional UNPRG. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/14047>
- Holguín-Sterling, L., Pedraza-Claros, B., Pérez-Salinas, R., Ortiz, A., Navarro-Escalante, L., & Góngora, C. E. (2023). Physical-chemical and metataxonomic characterization of the microbial communities present during the fermentation of three varieties of coffee from Colombia and their sensory qualities. *Agriculture*, 13(10), Artículo 1980. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101980>
- Jiménez Aldaz, S. R. (2024). *Impacto de la fermentación aeróbica y anaeróbica en las propiedades sensoriales del café (Coffea arabica) de las variedades Geisha, Bourbon* [Tesis de grado, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio de la Universidad Señor de Sipán. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/13729>

- Juárez González, T., Maldonado Astudillo, Y. I., González Mateos, R., Ramírez Sucre, M. O., Álvarez Fitz, P., & Salazar, R. (2021). Caracterización fisicoquímica y sensorial de café de la montaña de Guerrero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(6), 1057-1069. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2773>
- Lee, L. W., Cheong, M. W., Curran, P., Yu, B., & Liu, S. Q. (2015). Coffee fermentation and flavor – An intricate and delicate relationship. *Food Chemistry*, 185, 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.124>
- Mare Terra Coffee. (2023, 12 de julio). *Protocolo de puntuación SCA*. Recuperado el 19 de diciembre de 2024 de <https://mareterracoffee.com/es/blog/protocolo-de-puntuacion-sca/>
- Mendoza Marcillo, B. F., Pincay Menéndez, J. D., & Bravo Zamora, R. C. (2023). Influencia de la cosecha de café maduro y verde sobre la calidad física y organoléptica del café (*Coffea arabica* L.). *Agrosilvicultura y Medioambiente*, 1(1), 14-25. <https://revistas.unesum.edu.ec/agricultura/index.php/ojs/article/view/2>
- Meza Calixto, M. Y. (2019). *Factores que inciden en las características físicas y organolépticas del café fuera de grado comparada al café especial* [Tesis de grado, Universidad Nacional Agraria de La Selva]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria de La Selva. <https://hdl.handle.net/20.500.14292/1496>
- Morales Reyes, E. I., & Bolaños González, M. A. (s. f.). *Manual de manejo poscosecha y fermentaciones del fruto del café*. Programa Mexicano del Carbono. https://www.researchgate.net/profile/Martin-Bolanos-Gonzalez/publication/372935743_Manual_de_Manejo_Poscosecha_y_Fermentaciones_del_Fruto_del_Cafe/links/64ce693e91fb036ba6cb0061/Manual-de-Manejo-Poscosecha-y-Fermentaciones-del-Fruto-del-Cafe.pdf
- Morales-Reyes, E. I., Bolaños-González, M. A., Escamilla-Prado, E., & Libert-Amico, A. (2024). Post-harvest practices for the production of specialty coffees in Chiapas, Mexico. *Agrociencia*, 58(5), 557-571. <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v58i5.2880>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2025). *Cultivos y productos de ganadería*. Recuperado el 27 de febrero de 2025 de <https://www.fao.org/faostat/es/?#data/QCL>
- Organización Mundial de la Salud. (2023, 13 de septiembre). *Agua para consumo humano*. Recuperado el 18 de julio de 2024 de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Osorio, V., Pabón, J., & Gómez, C. R. (2024). Efecto del porcentaje de humedad del café en la actividad de agua. *Revista Cenicafé*, 75(1), Artículo e75104. <https://doi.org/10.38141/10778/75104>
- 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), Artículo e73101. <https://doi.org/10.38141/10778/73101>
- Osorio Pérez, V. (2021). La calidad del café. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3ª ed., pp. 219-234). Centro Nacional de Investigaciones de Café. https://doi.org/10.38141/10791/0014_12
- Osorio Pérez, V., Matallana Pérez, L. G., Fernández-Alduenda, M. R., Álvarez Barreto, C. I., Gallego Agudelo, C. P., & Montoya Restrepo, E. C. (2023). Chemical composition and sensory quality of coffee fruits at different stages of maturity. *Agronomy*, 13(2), Artículo 341. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020341>
- Ozuna, C., Mulík, S., Valdez-Rodríguez, B., Abraham-Juárez, M. a del R., & Fernández-López, C. L. (2020). The effect of organic farming on total phenols, total flavonoids, brown compounds and antioxidant activity of spent coffee grounds from Mexico. *Biological Agriculture & Horticulture*, 36(2), 107-118. <https://doi.org/10.1080/01448765.2019.1704876>

- Peñuela, A. E., & Sanz-Urbe, J. R. (2021). Obtenga café de calidad en el proceso de beneficio. En Centro Nacional de Investigaciones de Café (Ed.), *Guía más agronomía, más productividad, más calidad* (3ª ed., pp. 189-218). Centro Nacional de Investigaciones de Café. https://doi.org/10.38141/10791/0014_11
- Pereira, T. S., Batista, N. N., Santos Pimenta, L. P., Martinez, S. J., Ribeiro, L. S., Oliveira Naves, J. A., & Schwan, R. F. (2022). Self-induced anaerobiosis coffee fermentation: Impact on microbial communities, chemical composition and sensory quality of coffee. *Food Microbiology*, *103*, Artículo 103962. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2021.103962>
- Pereira, L. L., Guarçoni, R. C., Pinheiro, P. F., Osório, V. M., Pinheiro, C. A., Moreira, T. R., & Ten Caten, C. S. (2020). New propositions about coffee wet processing: chemical and sensory perspectives. *Food Chemistry*, *310*, Artículo 125943. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125943>
- Prado Martin, J. G., & Dea Lindner, J. (2022). Alimentos fermentados: pasado, presente e futuro. En Blücher, E. (Ed.), *Microbiología de alimentos fermentados* (1.a ed., pp. 29-62). Blucher. https://storage.blucher.com.br/book/pdf_preview/9786555061321-amostra.pdf
- Puerta Quintero, G. I. (2024, 3 de julio). *Los sabores especiales de la fermentación del café*. Café Gourmet Ensoñación. Recuperado el 15 de abril de 2025 de <https://cafegourmetensonacion.com/los-sabores-especiales-de-la-fermentacion-del-cafe/>
- Puerta-Quintero, G. I. (2016). Calidad física del café de varias regiones de Colombia según altitud suelos y buenas prácticas de beneficio. *Cenicafé*, *67*(1), 7-40. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/676>
- Puerta-Quintero, G. I. (2022, 8 de marzo). *Los factores de la fermentación del café*. Café Gourmet Ensoñación. Recuperado el 12 de marzo de 2025 de <https://cafegourmetensonacion.com/los-factores-de-la-fermentacion-del-cafe/>
- Puerta-Quintero, G. I. & Echeverry Molina, J. G. (2015). Fermentación controlada del café: Tecnología para agregar valor a la calidad. *Avances Técnicos Cenicafé*, *454*, 1-12.
- Rodríguez Frómata, R. A., Laencina Sánchez, J., & Ros García, J. M. (2020). Evaluation of coffee pulp as substrate for polygalacturonase production in solid state fermentation. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, *32*(2), 117-124. <https://doi.org/10.9755/ejfa.2020.v32.i2.2068>
- Sánchez Hernández, S. (2023). *Tecnologías del beneficiado, medición de huella hídrica y calidad de café en Veracruz* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma Chapingo]. Repositorio Chapingo. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/2976>
- Secretaría de Salud. (2022, 2 de mayo). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. *Diario Oficial de la Federación*. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2025). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Gobierno de México. Recuperado el 20 de julio de 2025 de https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Silva, L. C. F., Pereira, P. V. R., Da Cruz, M. A. D., Costa, G. X. R., Rocha, R. A. R., Bertarini, P. L. L., Do Amaral, L. R., Gomes, M. S., & Santos, L. D. (2024). Enhancing sensory quality of coffee: the impact of fermentation techniques on *Coffea arabica* cv. Catiguá MG2. *Foods*, *13*(5), Artículo 653. <https://doi.org/10.3390/foods13050653>
- Tan, Y., Wu, H., Shi, L., Barrow, C., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2023). Impacts of fermentation on the phenolic composition, antioxidant potential, and volatile compounds profile of commercially roasted coffee beans. *Fermentation*, *9*(10), Artículo 918. <https://doi.org/10.3390/fermentation9100918>