

Accepted Manuscript / Manuscrito Aceptado

Title Paper/Título del artículo:

Mejoramiento de la calidad en taza del café a través de modificaciones al proceso de fermentación espontánea

Improvement of coffee cup quality through modifications to the spontaneous fermentation process

Authors/Autores: Velázquez-Pulido, M., Díaz-Vela, J., Hernández-Cázares, A.S., Hernández-Martínez R., Elizondo-Gómez, G., Morales-Ramos, V.

ID: e2009

DOI: <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2009>

Received/Fecha de recepción: June 24th 2025

Accepted /Fecha de aceptación: August 18th 2026

Available online/Fecha de publicación: September 24th 2026

Please cite this article as/Como citar este artículo: Velázquez-Pulido, M., Díaz-Vela, J., Hernández-Cázares, A.S., Hernández-Martínez R., Elizondo-Gómez, G., Morales-Ramos, V. (2026). Improvement of coffee cup quality through modifications to the spontaneous fermentation process. *Revista Bio Ciencias*, 13, e2009. <https://doi.org/10.15741/revbio.13.e2009>

This is a PDF file of an unedited manuscript that has been accepted for publication. As a service to our customers we are providing this early version of the manuscript. The manuscript will undergo copyediting, typesetting, and review of the resulting proof before it is published in its final form. Please note that during the production process errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Este archivo PDF es un manuscrito no editado que ha sido aceptado para publicación. Esto es parte de un servicio de Revista Bio Ciencias para proveer a los autores de una versión rápida del manuscrito. Sin embargo, el manuscrito ingresará a proceso de edición y corrección de estilo antes de publicar la versión final. Por favor note que la versión actual puede contener errores de forma.

Artículo original/ Original article

Mejoramiento de la calidad en taza del café a través de modificaciones al proceso de fermentación espontánea

Improvement of coffee cup quality through modifications to the spontaneous fermentation process

El proceso de fermentación y la calidad del café /

Coffee fermentation and beverage quality

Velázquez-Pulido, M.¹, Díaz-Vela, J.², Hernández-Cázares, A.S.¹, Hernández-Martínez R.¹, Elizondo-Gómez, G.¹, Morales-Ramos, V.^{1*}

¹ Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba – Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes 94546, Veracruz, México.

² Universidad Politécnica de Huatusco. Predio Axol S/N, Reserva Territorial, Huatusco de Chicuellar 94106, Veracruz, México.

***Corresponding Author:**

Victorino Morales-Ramos, Colegio de Postgraduados Campus Córdoba. Carretera Federal Córdoba – Veracruz km 348, Congregación Manuel León, Amatlán de los Reyes 94546, Veracruz, México. Teléfono. 271 716 6000, 55 y 57. vicmor@colpos.mx

RESUMEN

El café es la segunda bebida más consumida en el mundo, después del agua, y está transitando de un producto comercial a uno de alta calidad. El presente estudio investiga el impacto de la maceración y adición de fuentes de carbono sobre los atributos sensoriales en taza del café, utilizando frutos provenientes de dos altitudes: 650 y 1,200 masl. Se aplicó un diseño en parcelas divididas, donde los tratamientos fueron el proceso de maceración carbónica y los subtratamientos la adición de fuentes de carbono. Los resultados demostraron que un proceso de 12 h de maceración carbónica de los frutos, mejora ($p < 0.05$) los atributos sensoriales de la bebida, especialmente del café cultivado y procesado en zonas bajas (650 masl), mientras que este tiempo de maceración no tuvo efectos significativos en las muestras cultivadas y procesadas a una altitud superior (1,200 masl). La adición de fuentes de carbono, como la pulpa y la sacarosa, a granos recién despulpados, mejoró significativamente atributos como el sabor, cuerpo y puntaje total, en muestras cultivadas y procesadas en zonas altas (1,200 masl). Lo anterior, demuestra el potencial para mejorar los atributos sensoriales del café mediante modificaciones al proceso de fermentación del grano.

PALABRAS CLAVE: Análisis físico del grano verde, Café de especialidad, Catación de café, Fuentes de carbono, Maceración carbónica.

ABSTRACT

Coffee is the second most consumed beverage in the world, after water, and is transitioning from a commercial product to a high quality one. The present study investigated the impact of maceration and the addition of carbon sources on the cupsensory attributes of coffee, using fruits from two altitudes: 650 and 1,200 masl. A split-plot design was applied, where the treatments were the carbonic maceration process and the sub-treatments were the addition of carbon sources. The results showed that a 12 h carbonic maceration process improved ($p < 0.05$) the sensory attributes of the beverage, especially in coffee grown and processed at low altitudes (650 masl), while this maceration time had

no significant effect on the samples grown and processed at a higher altitude (1,200 masl). The addition of carbon sources, such as pulp and sucrose, to freshly pulped beans significantly improved attributes such as flavor, body and total score in samples grown and processed at higher altitudes (1,200 masl). This demonstrates the potential for improving the sensory attributes of coffee through modifications to the bean fermentation process.

KEYWORDS: Carbon sources, carbonic maceration, coffee cupping, physical analysis of green beans, Specialty coffee.

Introducción

El café es una bebida muy importante alrededor del mundo y se encuentra como la segunda más consumida, después del agua (Gómez & Garbinato, 2025). El café ha experimentado una transformación de un producto convencional a uno de especialidad (Meeprom & Kokkhangplu, 2025). El acto de beber un café significa algo más que consumir una bebida, se trata de placer y experiencias sensoriales agradables. Esta evolución en la percepción del café ha impulsado no solo cambios en los hábitos de consumo, sino también en los procesos de producción, priorizando la calidad, la trazabilidad y las características sensoriales de la bebida (Gómez & Garbinato, 2025). En este contexto, la cafecultura adquiere una dimensión estratégica, ya que no solo responde a una demanda global creciente por cafés diferenciados, sino que también se convierte en un motor de desarrollo económico y social en las regiones productoras (Herrera & Zamora, 2025).

La producción y exportación de café en México es una actividad estratégica, tanto para la economía nacional como para el desarrollo social de las regiones cafetaleras. El país se ubica como el undécimo productor mundial de café, con una producción anual que supera los 4 millones de sacos de 60 kg, siendo Chiapas, Veracruz y Puebla los principales estados productores (SIAP, 2024). En términos de exportación, aproximadamente el 84 % de la producción nacional se destina a mercados internacionales, siendo Estados Unidos el principal destino, seguido por países de la Unión Europea como Bélgica, Alemania e Italia (Samoggia & Riedel, 2018). En el mercado internacional, el café arábica convencional se comercializa como commodity en la Bolsa de Nueva York, cuyos precios están sujetos a prácticas especulativas (Muñoz Rodríguez *et al.*, 2019).

La inestabilidad de los precios internacionales del café se relaciona con los reportes de inventarios físicos en el mercado, con factores como las heladas en las regiones productoras, la oferta del principal país productor (Brasil), la demanda y las políticas económicas internacionales, entre otros factores. Esa inestabilidad puede tener efectos catastróficos en los países productores, tan graves como la inseguridad alimentaria de las familias agricultoras, pues al no obtener ingresos suficientes, no pueden satisfacer sus necesidades básicas (Muñoz Rodríguez *et al.*, 2019). Los bajos precios a nivel rural obligan a los agricultores a considerar al menos una de las siguientes tres estrategias de sobrevivencia: 1) *reducir los costos de producción del café*, aplicando pocos o ningún insumo y disminuyendo al mínimo la mano de obra contratada (Gabriel-Hernández & Barradas, 2024). 2) *aumentar la producción por unidad de superficie*, esta es la opción menos socorrida, ya que requiere grandes inversiones, que involucran cambio a variedades más productivas y resilientes, demandantes de un manejo más intensivo de recursos, principalmente para la nutrición. La tercera estrategia 3) *mejorar la calidad del producto*, está siendo la de mayor impacto en las regiones cafetaleras, requiere la adopción de innovaciones en el manejo postcosecha, entre las cuales la práctica de maceración carbónica es una de las más prometedoras para mejorar los atributos sensoriales de la bebida de manera global. Esta estrategia cobra relevancia ante las oportunidades crecientes en mercados de café de especialidad, de alto valor agregado (Pérez-Fenández *et al.*, 2023).

En un contexto donde los precios del café convencional caen notablemente, la apuesta de los pequeños y medianos productores mexicanos debe ser por la calidad y el valor agregado; esa estrategia puede ser la clave para la sostenibilidad de los sistemas productivos. Apostar por la producción y comercialización de cafés de alta calidad, involucra que el productor conozca y aplique buenas prácticas de cultivo, de cosecha y de procesamiento del grano (Morales Ramos *et al.*, 2021).

Buenas prácticas de cultivo

Dentro de los factores de cultivo que más influencia tienen en la calidad de la bebida, se encuentra la altitud sobre el nivel del mar en que se encuentra el cafetal, lo cual hace sinergia con la presencia de una sombra diversificada (Misgana *et al.*, 2024). A medida que la altitud y la sombra aumentan, los perfiles de sabor son más complejos e intensos (Cassamo *et al.*, 2022).

En altitudes superiores a los 1,200 metros sobre el nivel del mar (masl), las temperaturas suelen ser más bajas y las variaciones diarias de temperatura (días cálidos y noches frías) son más marcadas, siendo factores fundamentales en el proceso de maduración de los frutos de café (Cassamo *et al.*, 2021). Por otro lado, a altitudes más bajas, generalmente por debajo de los 1,000 masl, el café tiende a madurar más rápido debido a que las temperaturas más altas aceleran el metabolismo de la planta, lo que puede resultar en granos con una menor concentración de compuestos metabólicos, falta de complejidad en el sabor y suelen tener un perfil sensorial más monótono, con una acidez menos pronunciada y un cuerpo más pesado y menos limpio (Hu *et al.*, 2024).

Buenas prácticas de cosecha

Cuando el fruto de café ha alcanzado su punto de madurez óptima (máximo nivel de °Brix en el jugo de pulpa) debe ser cosechado. La cosecha debe ser selectiva y oportuna para garantizar la calidad del grano y, en consecuencia, del producto final (Mendoza *et al.*, 2023). Es crucial que solo se recojan los granos maduros, ya que los inmaduros o sobremaduros pueden afectar el sabor de la bebida de café, resultando en una taza desequilibrada con notas amargas o desagradables. Para lograr esta selección se recurre a la cosecha manual, lo que permite a los recolectores elegir solo los granos maduros y dejar atrás los que aún están verdes o los sobremaduros. De esta manera, se asegura que los granos hayan acumulado la mayor cantidad de precursores de los compuestos del aroma y del sabor, que se desarrollan durante el proceso de tostado del grano (Cao, *et al.*, 2023).

Buenas prácticas de procesamiento postcosecha

El procesamiento postcosecha del café es un conjunto de etapas utilizadas para transformar los frutos de café recolectados de la planta en granos aptos para su comercialización y consumo. Dentro de las prácticas de procesamiento, el beneficiado húmedo tiene alto potencial para influir en la calidad final de la bebida (Osorio, 2021), por lo que este estudio tiene el objetivo de investigar el efecto de la maceración carbónica y la adición de diversas fuentes de carbono durante el proceso de fermentación, sobre los atributos de calidad sensorial evaluados en taza, con la finalidad de determinar las condiciones de beneficiado que permiten la producción de cafés especiales, de alto puntaje final en taza.

El proceso de fermentación del café

La fermentación es un proceso bioquímico realizado por diversos microorganismos que se encuentran en el ambiente de manera natural, cuya función es degradar los carbohidratos u otras fuentes de carbono presentes en el grano de café, mientras que se libera energía y se producen metabolitos como ácidos orgánicos, alcoholes y otros compuestos volátiles. Estos metabolitos son precursores que contribuyen a la formación de compuestos orgánicos volátiles característicos del sabor y aroma del café durante el proceso de tostado (da Silva *et al.*, 2022), además, la fermentación puede afectar significativamente la textura de la bebida, contribuyendo a un cuerpo más completo y cremoso (Braga *et al.*, 2023).

En la última década se han popularizado diferentes métodos de fermentación del café, como la maceración carbónica y la adición de fuentes de carbono externas, tales como diversas frutas, con el fin de enriquecer y diversificar los perfiles sensoriales del café. Estas innovaciones en el procesamiento del grano tienen como objetivo desarrollar perfiles sensoriales más complejos y diferenciados. La lógica detrás de esta práctica es que las frutas aportan azúcares simples y ácidos orgánicos que podrían favorecer el crecimiento de levaduras y bacterias específicas, modificando el metabolismo microbiano durante la fermentación y, en consecuencia, la formación de precursores de sabor y aroma, resultando en notas sensoriales más intensas, complejas y frutales (da Silva *et*

al., 2022), lo cual podría incrementar el valor en el mercado de los cafés procesados de esta forma. Sin embargo, a pesar del creciente interés en estas prácticas, muchas de estas afirmaciones siguen siendo anecdóticas y carecen de validación científica robusta. Además, la falta de estandarización en las condiciones de fermentación, el tipo y cantidad de fruta utilizada, y la trazabilidad de los resultados dificulta establecer conclusiones generalizables (He *et al.*, 2025). Por lo tanto, aunque estas prácticas representan una oportunidad interesante de innovación y diferenciación en el mercado, es necesario avanzar hacia una evaluación científica más rigurosa que permita entender sus efectos reales sobre la calidad del café y garantizar la reproducibilidad de los resultados sin comprometer la seguridad ni la estabilidad del producto final (Cao *et al.*, 2023).

La maceración es un proceso de fermentación controlada que ha ganado relevancia en la industria del café por su impacto en la calidad sensorial de la bebida. Consiste en colocar los frutos, o los granos despulpados, en un sistema sellado, generalmente tambos o bolsas herméticamente cerradas con una válvula unidireccional, que permite la evacuación de los gases generados durante el proceso de fermentación, principalmente CO₂, sin permitir la entrada de oxígeno (Mustafa *et al.*, 2024). El dióxido de carbono juega un papel crucial en este proceso al impedir la descomposición indeseada de los compuestos presentes en los granos, además de ayudar a desarrollar características aromáticas más complejas y perfiles de sabor más suaves y afrutados.

Los avances recientes en la maceración se han centrado en el ajuste de factores clave como la temperatura y la concentración de CO₂. Elhalis *et al.* (2023) mostraron que temperaturas bajas (entre 15-20 °C) fomentan una mayor producción de ácidos lácticos y acéticos, contribuyendo a un sabor más suave y una acidez más equilibrada. Además, observaron que la interacción de los compuestos presentes en el grano, como los ácidos clorogénicos y los azúcares, se ve alterada por las condiciones anaeróbicas. Esto favorece un perfil sensorial más limpio y suave, con un retrogusto menos áspero. Así mismo, la maceración puede influir en la liberación de cafeína y ácidos, mejorando la percepción general del café.

Los avances en la maceración anaeróbica abren nuevas posibilidades para los productores de café, permitiéndoles modular las condiciones de beneficiado para adaptarse a las preferencias del consumidor (Mustafa *et al.*, 2024). Además, el uso combinado con tecnologías como el secado solar, podría ofrecer beneficios tanto para la calidad del café como para la sostenibilidad de la producción. El desafío, sin embargo, radica en encontrar el equilibrio óptimo entre los factores involucrados en la maceración, tales como el tiempo de fermentación, la temperatura y la cantidad de CO₂ generado durante el proceso. A pesar de ser un proceso relativamente nuevo, en comparación con otros métodos de fermentación, la maceración está demostrando ser una técnica prometedora para la producción de cafés de alta calidad (Hernández-Alcántara *et al.*, 2023). A medida que más productores experimentan con este sistema cerrado, se prevé que surjan más innovaciones y descubrimientos que continúen perfeccionando la ciencia detrás de la fermentación del café y, en última instancia, los sabores que llegan a nuestra taza.

Material y métodos

En esta investigación se utilizó sólo café cereza en el punto óptimo de madurez (Figura 1), cosechado manualmente de plantaciones de *Coffea arabica* L. de las variedades Costa Rica, Oro Azteca y Colombia, cultivadas bajo condiciones de sombra diversificada. Se utilizaron frutos provenientes de dos orígenes (locaciones) diferentes, realizando el procesamiento in situ.

Locación 1: Los frutos de café se obtuvieron de la parcela “Catimores” del Colegio de Postgraduados, Campus Córdoba (COLPOS), ubicado en Amatlán de los Reyes, Veracruz, México. A una altura de 650 metros sobre el nivel del mar. La edad de la plantación oscila entre 10 y 20 años. El procesamiento de los frutos se realizó en el Área de Ciencia y Tecnología del Café.

Locación 2: Los frutos de café se obtuvieron de la parcela “El Plan” perteneciente al productor José Velázquez Hernández, en la comunidad de Opatla La Esperanza, municipio de Ixhuatlán del Café,

Veracruz, México. Altura de 1,200 metros sobre el nivel del mar. La edad de la plantación oscila entre 10 y 15 años. El procesamiento se realizó en el hogar del productor.

Procesamiento de café

En cada locación se realizaron cuatro réplicas (bloques), ensayando en cada bloque los tratamientos (parcelas grandes): con maceración carbónica de 12 horas y sin maceración. Para cada parcela grande se utilizaron 100 kg de café cereza. Para el tratamiento con maceración, la café cereza se colocó en cuatro bolsas Ecotact con dimensiones 60 x 80 cm, equipadas con una válvula unidireccional, la cual permitió la liberación de gases generados durante la fermentación, pero impidió la entrada de oxígeno, creando así un ambiente anaeróbico rico en CO₂. Las bolsas fueron selladas y almacenadas a temperatura ambiente durante 12 horas para llevar a cabo la maceración. Finalizado este periodo, los frutos fueron retirados de las bolsas para continuar con el proceso de despulpado. Para el tratamiento sin maceración, el despulpado se realizó el mismo día de cosecha del café.

Previo al despulpado, los frutos fueron sometidos a inmersión en agua potable, para eliminar los flotantes, asociados a frutos con granos vanos o dañados por broca (*Hypothenemus hampei*). Posteriormente, se llevó a cabo la remoción de la pulpa haciendo uso de una despulpadora horizontal DH-4 (Penagos, Colombia), que permitió la separación eficiente de la pulpa y los granos. Inmediatamente después del despulpado del fruto de cada tratamiento y réplica, en la locación respectiva, el grano se dividió en ocho bolsas Ecotact con 5 kg de grano despulpado cada una y se adicionaron al azar alguna de las ocho combinaciones de subtratamientos (parcelas chicas) generadas con las tres fuentes de carbono (a dos niveles cada una) que se describen a continuación.

1. Pulpa de café en dos niveles, 0 y 100 g kg⁻¹ de café despulpado. La pulpa de café, subproducto del procesamiento del grano, es rica en azúcares fermentables como glucosa y fructosa, así como en pectinas y compuestos fenólicos (Costa *et al.*, 2025). Su utilización como fuente de carbono en la fermentación ha demostrado mejorar la actividad microbiana y la calidad sensorial del café, empleando una formulación de 50 a 150 gramos de pulpa por kg de café despulpado (Pandey *et al.*, 2000).
2. Sacarosa en dos niveles, 0 y 20 g kg⁻¹ de café despulpado. La sacarosa ha sido utilizada, en concentraciones de 2 % p/v, para potenciar los procesos de fermentación (de Melo *et al.*, 2015); proporcionando una fuente adicional de carbono que favorece el crecimiento de levaduras y bacterias beneficiosas. Para facilitar la dispersión de la sacarosa se disolvió previamente en 200 mL de agua purificada de la marca Pureza. Como medida de homogeneidad en las muestras, se agregó la misma cantidad de agua a los subtratamientos que ensayaron el nivel bajo de sacarosa.
3. Yogur Lala natural sin azúcar a dos niveles, 0 y 20 g kg⁻¹ de café despulpado. El uso de yogur como inóculo en la fermentación del café introduce microorganismos beneficiosos como *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, que contribuyen a una fermentación controlada y a la mejora de las características sensoriales del café. Polanía *et al.* (2024) describen el uso de un inóculo con aproximadamente un 2.81 % de yogurt Tapioka sin azúcar, sin especificar la cantidad exacta en g kg⁻¹ de café despulpado. La proporción de 2.81 % es compatible con un grano de aproximadamente 20 g por kg de café.

Fermentación del grano despulpado

Cada lote de 5 kg de grano recién despulpado se colocó en bolsas Ecotact de alta barrera, grado alimenticio, con medidas de 30x40 cm y etiquetadas para su identificación (Figura 2). Se cuantificaron y registraron las lecturas de pH, °Brix y temperatura, al inicio del experimento y cada 2.5 horas hasta finalizar el mismo. Considerando a Vásquez *et al.* (2022), Peñuela *et al.* (2021) y Córdoba & Guerrero (2016), se decidió detener la fermentación a un pH de 4.5 ± 0.1. El pH se midió con un potenciómetro DPH-2, con precisión 0.1 (Atago, Japón); los grados Brix se midieron con un refractómetro de mano 0 – 32 °Brix, precisión 0.2 (Amerza, Perú); la temperatura se midió con un termómetro digital con precisión 0.1 °C (Panfrey, China). Todas las lecturas se registraron en una bitácora.

Para medir el pH se introdujo el sensor en el café despulpado durante al menos 2 minutos, hasta asegurar una lectura estable, y se repitió este procedimiento cada 2.5 horas en cada una de las repeticiones de los subtratamientos, desde inicio hasta finalizar el proceso de fermentación. Para medir la cantidad de sólidos solubles totales, se colocaron sobre la lente del refractómetro dos gotas del jugo que se acumulaba al fondo de cada bolsa. Repitiendo este procedimiento tres veces en cada bolsa al inicio del experimento. Para medir la temperatura se introdujo el sensor del termómetro hacia el centro de la bolsa, se esperó hasta que la temperatura se mantuviera constante durante 30 segundos.

Terminado el proceso de fermentación se procedió al lavado de cada subtratamiento con agua potable y se retiraron los flotes (en caso de encontrarse), posteriormente las muestras pasaron a escurrido por 20 minutos e inmediatamente después se pasaron a secado en camas africanas dentro de un secador solar, donde se monitoreó la humedad del grano utilizando un medidor de humedad con precisión de 0.05 % (Agratronix, USA) aproximadamente cada 12 h, dependiendo de las condiciones climáticas prevalecientes en el día. Cuando la humedad del grano alcanzó entre 11 – 12 % se retiró del secador solar y se colocó en bolsas de papel dentro de bolsas de plástico, debidamente etiquetadas, durante 3 a 4 semanas (Gallego & Rodríguez, 2021) a fin de que el grano se estabilice y pueda llegar a manifestar apropiadamente sus cualidades organolépticas.



Figura 1. Procesamiento del fruto. A) Cosecha selectiva oportuna, B) Maceración, C) Despulpado, D) Fermentación, E) Lavado y F) Secado. Fuente: Elaboración propia.

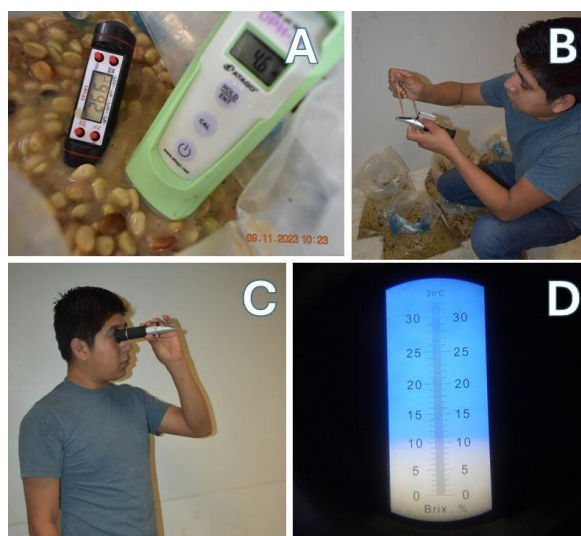


Figura 2. Monitoreo de fermentación. A) Monitoreo temperatura y pH, B) Toma de muestra en refractómetro, C) y D) Lectura de °Brix. Fuente: Elaboración propia.

Análisis sensorial

Se realizó el análisis sensorial de la bebida de acuerdo al protocolo descrito por la Specialty Coffee Association of America, (SCA, 2026) y la NMX-F-599-SCFI-2016 (ANCE, 2017), con la participación de cuatro catadores con más de 10 años de experiencia en la industria del café (Figura 3).



Figura 3. Análisis sensorial. A) Tostación previa al análisis sensorial, B) Pesado de muestra por taza, C) Molienda de muestra, D) evaluación de aroma, E) Preparación de infusión, F) Evaluación de fragancia y G) Degustación y evaluación de la muestra. Fuente: Elaboración propia.

Análisis estadístico

El diseño experimental empleado en cada una de las dos locaciones (altitudes) fue un diseño en parcelas divididas con dos tratamientos (con maceración, sin maceración) y cuatro bloques (réplicas). Cada tratamiento o parcela grande ensayó ocho subtratamientos o parcelas chicas (derivados de la combinación de niveles de las tres fuentes de carbono adicionadas). En cada locación se tuvieron ocho parcelas grandes y 64 parcelas chicas. Los datos se analizaron mediante el software estadístico R, bajo el ambiente RStudio (versión 2025.05.0+496). Se realizaron análisis de varianza, separando las medias mediante Tukey ($\alpha = 0.05$).

Resultados y discusión

El presente estudio evaluó el efecto de la fermentación del café mediante la técnica de maceración carbónica y la adición de diferentes fuentes de carbono (pulpa de café, sacarosa y yogur) en dos altitudes contrastantes: 650 y 1,200 masl, con el objetivo de mejorar la calidad en taza del café, *Coffea arabica* L.

Maceración

Los resultados obtenidos indican que los tratamientos o parcelas grandes (con y sin proceso de maceración carbónica) tuvieron un efecto diferencial sobre la calidad sensorial del café producido y procesado en la locación COLPOS (650 masl), es decir, que las muestras evaluadas que incluyeron 12 h de maceración carbónica, obtuvieron puntajes en los atributos sensoriales significativamente ($p < 0.05$) más altos que las muestras sin maceración, en concordancia con los resultados documentados por Azmi *et al.* (2024). Sin embargo; en la locación de Ixhuatlán del Café (1,200 masl), el efecto de la inclusión del proceso de maceración por 12 h no fue significativo ($p > 0.05$) en el puntaje de los atributos sensoriales, en comparación con las muestras sin maceración. Las condiciones climáticas de cada locación influyeron claramente en la respuesta de los frutos a la maceración carbónica. Es muy posible que locaciones de mayor altitud o con clima más fresco, requieran mayores tiempos de maceración. En Ixhuatlán, la menor temperatura ambiente favoreció la ralentización de la actividad microbiana, lo que podría explicar la falta de efecto significativo de la maceración, observada en esta locación en el periodo de tiempo evaluado. A temperaturas por debajo de 20 °C, la fermentación microbiana puede volverse muy lenta y generar perfiles menos impactantes y, por el contrario, en COLPOS (650 masl) la mayor temperatura ambiental, que puede asociarse con una mayor actividad microbiana, parece haber influido positivamente en el proceso de maceración carbónica, ayudando a reducir defectos típicos de fermentaciones rápidas en climas cálidos, como lo describen dos Santos *et al.* (2025).

Para el caso de COLPOS, la maceración por 12 h del fruto de café tuvo impactos positivos en los principales atributos sensoriales evaluados en taza: aroma, sabor, retrogusto, acidez, cuerpo, apreciación general y puntaje total. En el atributo aroma, los granos sometidos a maceración alcanzaron una puntuación media de 7.697 ± 0.165 , significativamente superior al valor obtenido sin maceración (7.419 ± 0.195). Este mismo patrón se repitió en sabor (7.580 ± 0.187 con maceración vs 7.324 ± 0.199 sin maceración), retrogusto (7.478 ± 0.203 vs 7.236 ± 0.199), acidez (7.535 ± 0.232 vs 7.295 ± 0.183), cuerpo (7.645 ± 0.096 vs 7.396 ± 0.176) y apreciación general (7.728 ± 0.272 vs 7.456 ± 0.183), lo que sugiere que la maceración potenció el desarrollo de precursores, que promueven la formación de compuestos orgánicos volátiles durante el proceso de tostado, modulantes del aroma y sabor del café. De manera global, estas diferencias se reflejaron en un puntaje total, significativamente mayor en los cafés con maceración (83.516 ± 1.000), respecto a los no macerados (81.934 ± 1.020), indicando un perfil sensorial más equilibrado y complejo. Estos resultados son consistentes con lo reportado por de Melo *et al.* (2020) y Silva *et al.* (2021), quienes documentaron que la maceración carbónica puede mejorar atributos como dulzor, aroma y limpieza de taza, especialmente en ambientes cálidos y de baja altitud, donde las fermentaciones tienden a ser más activas. En este caso, el café de baja altitud (650 masl), macerado por 12 h, obtuvo puntajes

finales en taza similares a los obtenidos por el grano de estricta altura (1,200 masl), lo que permite visualizar el potencial para mejorar aún más la calidad del café de baja altitud, aumentando los tiempos de maceración carbónica.

Adición de fuentes de carbono

El análisis de la adición de fuentes de carbono, correspondientes a las combinaciones de tres fuentes (factores de estudio): pulpa de café 0 y 100 g kg⁻¹, sacarosa y yogurt, cada una a dos niveles: 0 y 20 g kg⁻¹, nos permite presentar los siguientes resultados.

No se encontró interacción significativa entre los tratamientos y los subtratamientos, es decir, la respuesta de la adición de una fuente de carbono particular, sobre los atributos sensoriales en taza, fue independiente de si el fruto fue o no macerado. Para la locación de COLPOS, no se observaron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) en el puntaje de los atributos sensoriales con la adición de alguna combinación de las fuentes de carbono estudiadas.

En la locación de Ixhuatlán del Café, se encontraron diferencias significativas en los atributos de sabor, cuerpo y puntaje total. El atributo sabor en el subtratamiento 2, con solo pulpa adicionada, (nivel alto de pulpa de café y bajos de sacarosa y yogur), obtuvo la puntuación más alta (7.688 ± 0.206) en comparación con los demás subtratamientos, marcando una diferencia significativa ($p < 0.05$) con el subtratamiento 8 (niveles altos de pulpa, sacarosa y yogur), con un puntaje de 7.359 ± 0.145 . Este resultado indica que la adición aislada de pulpa de café, en cantidades bajas, como fuente de carbono, puede tener un efecto positivo sobre la percepción sensorial del sabor, posiblemente debido a su contenido natural de azúcares simples, ácidos orgánicos y compuestos fenólicos que actúan como sustratos fermentables, favoreciendo la producción de metabolitos aromáticos afrutados durante la fermentación (Costa *et al.*, 2025). Por el contrario, el subtratamiento 8, que contenía los niveles altos de los tres factores (pulpa, sacarosa y yogur), obtuvo la menor puntuación, sugiriendo que la interacción simultánea de estas tres fuentes de carbono, en las condiciones de Ixhuatlán del Café (16 a 19 °C durante el periodo de fermentación), crearon condiciones poco favorables para el desarrollo de bacterias termófilas lácticas, correlacionadas con mayores puntuaciones en los atributos sensoriales (da Silva *et al.*, 2023). Al mismo tiempo, estas condiciones pueden haber favorecido la competencia microbiana, con desbalance de nutrientes o acumulación de subproductos no deseados. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Costa *et al.* (2025), quienes destacaron que la pulpa de café, cuando se utiliza como único aditivo, puede mejorar la actividad microbiana benéfica sin generar fermentaciones indeseadas. Asimismo, estudios previos (Polanía *et al.*, 2024) han mostrado que fermentaciones simples y en condiciones ambientales estables, tienden a producir cafés con perfiles más limpios y definidos. En este sentido, los resultados en Ixhuatlán, donde no hubo efecto de la maceración carbónica (posiblemente por el corto tiempo, 12 h, ensayado), indican que, bajo condiciones de altitud elevada y temperaturas moderadas, la adición de pulpa de café por sí sola puede ser suficiente para potenciar el sabor, sin necesidad de complejizar el proceso con múltiples aditivos.

El atributo cuerpo alcanzó sus valores más altos en los subtratamientos 3, con solamente sacarosa adicionada (nivel alto de sacarosa y bajo de pulpa y yogur), 6 (bajo de sacarosa y alto de pulpa y yogur) y 4 (niveles altos de pulpa y sacarosa, bajo de yogur), con puntuaciones de 7.633 ± 0.091 , 7.617 ± 0.140 y 7.602 ± 0.137 , respectivamente, superando significativamente ($p < 0.05$) al subtratamiento 8 (niveles altos en los tres factores), que obtuvo un puntaje de 7.406 ± 0.129 . Estos resultados indican que ciertas combinaciones de fuentes de carbono pueden influir positivamente en la percepción del cuerpo del café, particularmente aquellas que incorporan sacarosa, ya sea de manera individual o combinada, tal como lo reportan Wang *et al.* (2024). La sacarosa es reconocida por estimular la actividad de microorganismos benéficos como levaduras y lactobacilos, lo que favorece la síntesis de polisacáridos y compuestos estructurales que aportan viscosidad y densidad a la bebida. El puntaje bajo del subtratamiento 8 podría deberse a una fermentación desbalanceada, en la que la coexistencia de múltiples microorganismos genera una competencia por sustratos o la producción de subproductos que no favorecen la percepción sensorial del cuerpo. Esta interpretación concuerda con lo reportado por de Melo *et al.* (2015), quienes mencionan que el uso moderado de

azúcares puede potenciar atributos positivos del café, mientras que combinaciones múltiples mal controladas tienden a generar perfiles sensoriales más difusos o inconsistentes.

En cuanto al puntaje total, el subtratamiento 3 (nivel alto de sacarosa y bajo en pulpa y yogur), obtuvo la calificación más alta (83.673 ± 0.913), significativamente superior ($p < 0.05$) a la del subtratamiento 8, niveles altos de pulpa, sacarosa y yogurt, que alcanzó el puntaje más bajo (82.260 ± 0.517). La adición de sacarosa durante la fermentación puede mejorar de manera consistente la calidad sensorial global del café, al actuar como una fuente de carbono fácilmente disponible para los microorganismos benéficos durante la fermentación, facilitando la producción de metabolitos que enriquecen el perfil aromático y sensorial de la bebida. La menor puntuación observada en el subtratamiento 8 sugiere que la inclusión simultánea de las tres fuentes de carbono puede generar condiciones fermentativas más complejas o inestables, afectando negativamente la calidad final en taza. Esto podría estar relacionado con una competencia microbiana desbalanceada o con la acumulación de compuestos indeseados que interfieren con el desarrollo óptimo de atributos como el cuerpo, el sabor y la limpieza en taza, si bien, la adición de fuentes de carbono puede mejorar ciertos atributos del café fermentado, su exceso o combinación sin control puede tener efectos adversos sobre la puntuación de los atributos sensoriales del café (de Melo *et al.*, 2020).

Sin maceración

En todos los subtratamientos sin maceración, el café cultivado en Ixhuatlán (1,200 masl) presentó calificaciones sensoriales significativamente ($p < 0.05$) más altas que el café cultivado en COLPOS (650 masl). Este resultado indica que, mediante el procesamiento tradicional del café lavado, los frutos cultivados a mayor altitud expresan una calidad sensorial superior, particularmente en atributos como el sabor, la acidez y el puntaje total. Esta tendencia ha sido ampliamente documentada en la literatura científica. Por ejemplo, Worku *et al.* (2023) señalan que la altitud tiene un efecto directo sobre la tasa de maduración del fruto, la acumulación de azúcares y compuestos volátiles, así como sobre la densidad del grano, factores que en conjunto favorecen una mayor complejidad y claridad sensorial en taza.

Las condiciones propias de una mayor altitud, como temperaturas más bajas, ciclos de maduración más largos y diferencias microclimáticas, favorecen un desarrollo más lento y equilibrado del fruto, lo que se traduce en perfiles de taza más limpios, florales y con acidez brillante. En contraste, el café cultivado en altitudes bajas, como en COLPOS, suele estar expuesto a temperaturas más altas que aceleran la maduración del fruto, reduciendo el tiempo de acumulación de metabolitos clave y, por tanto, limitando su expresión sensorial. Estos hallazgos confirman que la altitud es un determinante natural de la calidad intrínseca del café, y refuerzan la importancia de incluir prácticas tecnológicas adaptadas a cada entorno, para maximizar el potencial sensorial de la bebida.

Con maceración

Cuando se compararon las muestras maceradas provenientes de Ixhuatlán (1,200 masl) y COLPOS (650 masl), los análisis mostraron que la mayoría de los atributos sensoriales no presentaron diferencias significativas entre localidades, lo que sugiere que la maceración carbónica tiene el potencial de mejorar el perfil sensorial del café proveniente de zonas bajas. Este hallazgo es relevante, ya que implica que la práctica de maceración puede mejorar significativamente los atributos sensoriales de una muestra de café, abriendo la puerta a la realización de estudios más finos al respecto. El efecto estabilizador de la maceración ha sido reportado por Silva *et al.* (2021), quienes encontraron que la fermentación anaeróbica bajo condiciones de maceración carbónica puede generar cafés con atributos sensoriales más definidos y repetibles, incluso en regiones con variabilidad climática. Sin embargo, es importante señalar que, aunque no se detectaron diferencias estadísticas en la mayoría de los atributos, COLPOS presentó valores sensoriales levemente superiores en atributos como aroma y puntaje total, lo que podría estar relacionado con una mayor

actividad microbiana inducida por las temperaturas más altas, características de altitudes bajas, lo que favorece la generación de compuestos volátiles deseables (Vásquez *et al.*, 2022). Estos resultados abren la posibilidad de utilizar la maceración como una herramienta tecnológica para mejorar la calidad sensorial del café de baja altitud.

Conclusiones

En el presente trabajo se demuestra que es posible mejorar la puntuación de los atributos sensoriales del café (*Coffea arabica*), mediante la modulación de las condiciones del proceso de fermentación. La incorporación de una etapa de 12 h de maceración carbónica del fruto, previa al despulpado, puede mejorar significativamente el puntaje final en taza del café procesado, siendo particularmente evidente en muestras cultivadas y procesadas en zonas de baja altitud, donde las condiciones de temperatura ambiental favorecen la proliferación de microorganismos que degradan las fuentes de carbono presentes de forma natural en el fruto de café. La adición de fuentes de carbono, al principio del proceso de fermentación del grano despulpado, puede tener un impacto positivo en los atributos de sabor, cuerpo y puntaje total en taza, principalmente en muestras cultivadas y procesadas en zonas altas (1,200 masl).

Alcances y limitaciones

Las condiciones de maceración/fermentación evaluadas, permitieron documentar hallazgos relevantes para los productores integrados a la cadena de valor, que comercializan café pergamino o tostado y molido, permitiéndoles la posibilidad de mejorar la calidad para alcanzar mejores precios de mercado. El estudio de maceración del fruto se realizó solamente durante 12 h, sería interesante extender las horas de maceración a 24, 48, 72, 96, o más horas; considerando como factor de estudio la temperatura ambiente. Así mismo, sería interesante evaluar las fuentes de carbono adicionadas, durante mayores tiempos de fermentación y/o en condiciones de saturación de CO₂ (maceración carbónica).

Contribución de los autores

Conceptualización del trabajo, autores VMR, MVP; desarrollo de la metodología, JDV, ASHC, RHM, MVP; manejo de software, VMR; validación experimental MVP, GEG; análisis de resultados, MVP, JDV, ASHC, RHM, GEG, VMR; Manejo de datos, MVP, VMR; escritura y preparación del manuscrito, MVP, GEG, VMR; redacción, revisión y edición, MVP, JDV, ASHC, RHM, GEG, VMR.

Todos los autores de este manuscrito han leído y aceptado la versión publicada del mismo.

Financiamiento

Este trabajo fue financiado mediante el proyecto denominado “Desarrollo de una propuesta tecnológica para agregar valor al café cereza, mediante el empleo de fermentaciones controladas para el procesamiento de cafés de alto puntaje en taza”, el cual fue apoyado por Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico, a través del convenio 2211221332. Los financiadores no tuvieron ningún papel en el diseño del estudio, la recolección de datos, ni en la elaboración del manuscrito.

Agradecimientos

A los productores que aportaron su café de forma desinteresada al proyecto.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés financieros, personales, académicos ni de otra índole que puedan haber influido en la ejecución del estudio ni en la presentación y publicación de sus resultados, conforme a los principios éticos y de transparencia establecidos por la Revista Bio Ciencias de la Universidad Autónoma de Nayarit.

Referencias

- Asociación de Normalización y Certificación A.C. [ANCE]. (2017, Abril 23). NMX-F-599-SCFI-2016 Café verde - Protocolo de evaluación sensorial. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-f-599-scfi-2016/>
- Azmi, N., Abubakar, Y., Widayat, H. P., Nilda, C., Yunika, M., Andini, S., Rahmi, F., & Muzaifa, M. (2024). What is carbonic maceration coffee? A mini review on production and quality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1356(1), Article 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1356/1/012007>
- Braga, A. V. U., Miranda, M. A., Aoyama, H., & Schmidt, F. L. (2023). Study on coffee quality improvement by self-induced anaerobic fermentation: Microbial diversity and enzymatic activity. *Food Research International*, 165, 112528. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2023.112528>
- Cao, X., Wu, H., Viejo, C. G., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2023). Effects of postharvest processing on aroma formation in roasted coffee – a review. *International Journal of Food Science and Technology*, 58(3), 1007–1027. <https://doi.org/10.1111/IJFS.16261>
- Cassamo, C. T., Manguze, A. V. J., Leitão, A. E., Pais, I. P., Moreira, R., Campa, C., Chiulele, R., Reis, F. O., Marques, I., Scotti-Campos, P., Lidon, F. C., Partelli, F. L., Ribeiro-Barros, A. I., & Ramalho, J. C. (2022). Shade and altitude implications on the physical and chemical attributes of green coffee beans from Gorongosa Mountain, Mozambique. *Agronomy*, 12(10), 2540. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12102540>
- Córdoba, N. M., & Guerrero, 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. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)75-83](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)75-83)
- Costa, A. S. G., Peixoto, J. A. B., Machado, S., Espírito Santo, L., Soares, T. F., Andrade, N., Azevedo, R., Almeida, A., Costa, H. S., Oliveira, M. B. P. P., Martel, F., Simal-Gandara, J., & Alves, R. C. (2025). Coffee pulp from Azores: A novel phytochemical-rich food with potential anti-diabetic properties. *Foods*, 14(2), 306. <https://doi.org/10.3390/FOODS14020306>
- da Silva, M. C. S., da Luz, J. M. R., Veloso, T. G. R., Gomes, W. dos S., Oliveira, E. C. da S., Anastácio, L. M., Cunha, A., Moreli, A. P., Guarçoni, R. C., Kasuya, M. C. M., & Pereira, L. L. (2022). Processing techniques and microbial fermentation on microbial profile and chemical and sensory quality of the coffee beverage. *European Food Research and Technology*, 248(6), 1499–1512. <https://doi.org/10.1007/S00217-022-03980-6/FIGURES/7>
- da Silva, M. C. S., Veloso, T. G. R., Junior, D. B., Bullergahn, V. B., da Luz, J. M. R., Menezes, K. M. S., Guarçoni, R. C., Kasuya, M. C. M., & Pereira, L. L. (2023). Bacterial community and sensory quality from coffee are affected along fermentation under carbonic maceration. *Food Chemistry Advances*, 3, 100554. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100554>
- de Melo, G. V., da Silva, A., de Carvalho, D. P., Muynarsk, E. S., Soccol, V. T., & Soccol, C. R. (2020). Lactic acid bacteria: what coffee industry should know? *Current Opinion in Food Science*, 31, 1–8. <https://doi.org/10.1016/J.COFS.2019.07.004>
- de Melo, G. V., Neto, E., Soccol, V. T., Medeiros, A. B. P., Woiciechowski, A. L., & Soccol, C. R. (2015). Conducting starter culture-controlled fermentations of coffee beans during on-farm wet processing: Growth, metabolic analyses and sensorial effects. *Food Research International*, 75, 348–356. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2015.06.027>
- dos Santos, W., Partelli, F. L., da Silva, E. C., Guimarães, C. V., Simmer, M. M. B., Filete, C. A., Guarçoni, R. C., da Luz, J. M. R., Moreli, A. P., & Pereira, L. L. (2025). Fermentation time and temperature induce changes in the volatile and sensory profile of *Coffea canephora* var. Conilon

- subjected to carbonic maceration. *Journal of Food Composition and Analysis*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.107636>
- Elhalis, H., Cox, J., & Zhao, J. (2023). Coffee fermentation: Expedition from traditional to controlled process and perspectives for industrialization. *Applied Food Research*, 3(1), 100253. <https://doi.org/10.1016/J.AFRES.2022.100253>
- Gabriel-Hernández, L., & Barradas, V. L. (2024). Panorama of coffee cultivation in the central zone of Veracruz State, Mexico: Identification of main stressors and challenges to face. *Sustainability*, 16(2), 802. <https://doi.org/10.3390/su16020802>
- Gallego, C. P., & Rodríguez, N. (2021). Identificación de algunas variables fisicoquímicas y microbiológicas asociadas con el defecto reposo en el café. *Revista Cenicafé*, 72(1), e72105. <https://doi.org/10.38141/10778/72105>
- Gómez, C., & Garbinato, B. (2025). Blockchain technology to improve traceability in the coffee supply chain: A systematic literature review. *International Journal of Information Management Data Insights*, 5(2), 100359. <https://doi.org/10.1016/j.ijime.2025.100359>
- He, Z., Cao, L., Zhao, L., Zhou, Y., Gong, J., Zhu, C., & Tan, C. (2025). Effects of the mixed fermentation of apples and yeast on the sensory evaluation, physicochemical composition and flavor of coffee beans. *Food Bioscience*, 68, 106337. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2025.106337>
- Hernández-Alcántara, G., Alarcón-Gutiérrez, E., Ronzón-Soto, S., & García-Pérez, J. A. (2023). Physical and sensorial quality of yellow Caturra coffee after a carbonic maceration process. *Coffee Science*, 18:e182134. <https://doi.org/10.25186/v18i.2134>
- Herrera, O. B., & Zamora, C. B. (2025). Territorios cafetaleros en México: Claves para una tipología de productores. *Revista de El Colegio de San Luis*, 15(26), 1–27. <https://doi.org/10.21696/rcsl152620251628>
- Hu, R., Xu, F., Chen, X., Kuang, Q., Xiao, X., & Dong, W. (2024). The growing altitude influences the flavor precursors, sensory characteristics and cupping quality of the Pu'er coffee bean. *Foods*, 13(23), 3842. <https://doi.org/10.3390/foods13233842>
- Meeprom, S., & Kokkhangplu, A. (2025). Customer experience and satisfaction in coffee consumption: an experiential marketing perspective. *Cogent Business & Management*, 12(1). <https://doi.org/10.1080/23311975.2025.2450296>
- Mendoza, B. F., Pincay, J. D., & Bravo, R. C. (2023). Influencia de la cosecha de café maduro y verde sobre la calidad física y organoléptica del café (*Coffea arábica* L.). *Agrosilvicultura y Medioambiente*, 1(1), 14–25. <https://doi.org/10.47230/AGROSILVICULTURA.MEDIOAMBIENTE.V1.N1.2023.14-25>
- Misgana, Z., Garedew, W., Alemayehu, Y., Bekeko, Z., & Nebiyu, A. (2024). The influence of shade tree species and coffee varieties on selected soil physicochemical properties in coffee-based farming system of southwestern Ethiopia. *Trees, Forests and People*, 17, 100650. <https://doi.org/10.1016/J.TFP.2024.100650>
- Morales Ramos, V., Escamilla Prado, E., Muñoz Rodríguez, M., Velázquez Morales, J. A., & Spinoso Castillo, J. L. (2021). Perfiles de Calidad del Café de México. Ed. Biblioteca Básica de Agricultura. México.
- Muñoz Rodríguez, M., Gómez Pérez, D., Santoyo Cortés, V. H., & Rosales Lechuga, R. (2019). Los Negocios del Café ¿Cómo innovar en el contexto de la paradoja del café, en pro de una red de valor más inclusiva y accesible? Ed. Universidad Autónoma Chapingo, CIESTAAM. <https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/20.500.12098/272>
- Mustafa, A., Salengke, S., Laga, A., Bastian, F., Hasizah, A., & Reta, R. (2024). Ohmic-based carbonic maceration of arabica coffee cherries: a review. *BIO Web Conf.*, 96. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249601010>

- Osorio, V. (2021). La calidad del Café. In Guía más agronomía, más productividad, más calidad (3ra. Ed., pp. 219–234). *Revista Cenicafé*. https://doi.org/10.38141/10791/0014_12
- Pandey, A., Soccol, C. R., & Mitchell, D. (2000). New developments in solid state fermentation: I-bioprocesses and products. *Process Biochemistry*, 35(10), 1153–1169. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(00\)00152-7](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(00)00152-7)
- Peñuela, A. E., Tibaduiza, C. A., Morcillo, C. A., & Restrepo, M. V. (2021). Degradación enzimática de mucílago de *Coffea arabica* L., para la producción de café suave lavado. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 19(2), 170–183. <https://doi.org/10.18684/bsaa.v19.n2.2021.1848>
- Pérez-Fernández, Y., Ramírez-Valverde, B., & Cruz-León, A. (2023). ¿Cereceros o cooperativistas? Una decisión para la continuidad del cultivo de “café” (*Coffea*) en México. *Revista Investigium IRE: Ciencias Sociales y Humanas*, 14(2), 210–229. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.231402.09>
- Polanía, A. M., López, J., Torres-Valenzuela, L., & Plaza-Dorado, J. L. (2024). From waste to taste: Coffee by-products as starter cultures for sustainable fermentation and improved coffee quality. *Sustainability*, 16(23), 10763. <https://doi.org/10.3390/su162310763>
- Samoggia, A., & Riedel, B. (2018). Coffee consumption and purchasing behavior review: Insights for further research. *Appetite*, 129, 70–81. <https://doi.org/10.1016/J.APPET.2018.07.002>
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [SIAP]. (2024). Cierre de la producción agrícola. https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/
- Silva, F. B., Tormena, C. D., Pauli, E. D., de Almeida, A. G., Berg, A. B. C., Rakocovic, M., Bruns, R. E., Scarminio, I. S., & Marcheeafave, G. G. (2021). Time dependent berry maturation for planting density levels in *Coffea arabica* L. beans: Mixture design-fingerprinting using near-infrared transmittance spectroscopy. *Journal of Food Composition and Analysis*, 97, 103795. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2020.103795>
- Specialty Coffee Association [SCA]. (2026 Septiembre 18). Resources - Cupping protocols. <https://podiumcoffeeclub.com/blogs/blog/sca-cupping-protocol>
- Vásquez, B. M., Rueda, C. A., & Bello, L. A. (2022). Determinación del pH y tiempo de fermentación teniendo en cuenta la temperatura ambiental durante el beneficio de café de variedad Castillo. *Revista Matices Tecnológicos*, 14. <https://revistas.unisangil.edu.co/index.php/revistamaticestecnologicos/article/view/507>
- Wang, Y., Wang, X., Quan, C., Al-Romaima, A., Hu, G., Peng, X., & Qiu, M. (2024). Optimizing commercial Arabica coffee quality by integrating flavor precursors with anaerobic germination strategy. *Food Chemistry: X*, 23, 101684. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2024.101684>
- Worku, M., Astatkie, T., & Boeckx, P. (2023). Shade and postharvest processing effects on arabica coffee quality and biochemical composition in lowland and midland coffee-growing areas of southwestern Ethiopia. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115(1), 105027. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2022.105027>