


Compuestos volátiles y su relación con la calidad del café diferenciado en el procesamiento vía húmeda

Valentina Osorio Pérez * | Aristóteles Ortiz ** | Luis Carlos Imbachí *** | M.R. Fernández-Alduenda ****

* Investigador Científico II. Calidad, Centro Nacional de Investigaciones de Café–Cenicafé, Manizales, Colombia 
Correspondencia: valentina.osorio@cafedecolombia.com

** Investigador Científico I. Fisiología, Cenicafé 

*** Asistente de Investigación. Biometría, Cenicafé 

**** Director Técnico. Specialty Coffee Association

El café contiene más de mil compuestos volátiles y de estos aproximadamente 30 contribuyen a la percepción de los atributos sensoriales de la bebida y son clave en la evaluación de su calidad. Los precursores de estos compuestos se generan en el cultivo y en el procesamiento poscosecha, y se transforman durante el proceso de tueste mediante diversas reacciones. Entre los grupos químicos más relevantes se encuentran los furanos, pirazinas, ácidos, alcoholes y aldehídos, entre otros; las diversas combinaciones y proporciones de estos compuestos en el grano de café permiten discriminar entre cafés de alta calidad y aquellos con defectos sensoriales. Esta investigación evaluó 48 diferentes compuestos volátiles de granos de café obtenidos de frutos con tres diferentes estados de madurez, sometidos a reserva del fruto y a fermentación prolongada del mucílago. La reserva del fruto presentó cambios, entre otros, en el acetato de etilo, el ácido acético y el etanol, lo que contribuyó al desarrollo de características frutales y de frutos rojos en los tratamientos con mayor tiempo de reserva (48 horas). Mientras que la fermentación prolongada del mucílago en frutos en estados de madurez avanzados y con mayor temperatura disminuyó los puntajes de cinco atributos sensoriales generando sabor a fermento y este defecto se relacionó con mayores valores de compuestos volátiles como el hexanal y el ácido 3-metilbutanoico.

Palabras clave: Frutal, madurez, calidad, fermentación, fermento, tiempo, temperatura, café, Cenicafé, Colombia.

Volatile compounds and their relation with differentiated coffee quality by wet processing

Coffee contains more than one thousand volatile compounds, of which approximately thirty play a key role in the perception of beverage sensory attributes and are considered major determinants of cup quality. The precursors of these compounds are formed during coffee cultivation and postharvest processing and are subsequently transformed during roasting through multiple chemical reactions. Among the most relevant classes of volatile compounds are furans, pyrazines, organic acids, alcohols, and aldehydes. The composition and relative abundance of these compounds enable discrimination between high-quality coffees and those presenting sensory defects. This study evaluated 48 volatile compounds in coffee beans obtained from fruits harvested at three ripening stages and subjected to fruit reserve and prolonged mucilage fermentation. Fruit reserve significantly modified the concentrations of compounds such as ethyl acetate, acetic acid, and ethanol, contributing to the development of fruity and red-fruit sensory notes, particularly after 48 h of reserve. In contrast, prolonged mucilage fermentation of fruits at advanced ripening stages and under higher fermentation temperatures reduced the scores of five sensory attributes and promoted fermenting flavor defect which is commonly associated with increased concentrations of volatile compounds such as hexanal and 3-methylbutanoic acid.

Keywords: Fruity, ripeness, quality, fermentation, fermented, time, temperature, coffee, Cenicafé, Colombia.



Recibido: 29/10/2025

Aceptado: 26/1/2026

Publicado: 30/6/2026

Editado por:

Diana María Molina
Cenicafé

Citación (APA 7.ª ed.):

Osorio, V., Ortiz, A., Imbachí, L. C., & Fernández-Alduenda, M. R. (2026). Compuestos volátiles y su relación con la calidad del café diferenciado en el procesamiento vía húmeda. *Revista Cenicafé*, 77(1), e77103. <https://doi.org/10.38141/10778/77103>



Introducción

El beneficio húmedo del café requiere el procesamiento inmediato del fruto tras la cosecha, para evitar riesgos en la generación de defectos sensoriales, pero actualmente la tendencia para lograr la diferenciación sensorial en la poscosecha está asociada a prolongar los tiempos de contacto del grano con sus partes constitutivas como el exocarpio y el mesocarpio, durante las diversas etapas del proceso. El almacenamiento controlado del fruto ha dado origen a los cafés “reservados”, caracterizados por un tiempo de permanencia previo al procesamiento. Se ha reportado que la permanencia de la cáscara y el mucílago hasta siete días no afecta la calidad (Caixeta et al., 2013), aunque los tiempos recomendados dependen de la condición de almacenamiento, siendo menores en bolsas plásticas y mayores en frutos sumergidos en agua, con mejoras sensoriales asociadas al cambio diario (Yusianto & Nugroho, 2014). Así mismo, ajustes en los tiempos de espera y fermentación han mostrado que 12 horas previas al despulpado y 24 horas de fermentación optimizan la calidad (Peñuela-Martínez et al., 2018); no obstante, retrasos excesivos incrementan el riesgo microbiano y la formación de ocratoxina A, por lo que se recomienda minimizar el tiempo entre cosecha y procesamiento y emplear almacenamiento sombreado y ventilado (Velmourougane et al., 2011). Estos procesos influyen directamente en la formación de compuestos volátiles responsables del aroma del café, como alcoholes, ésteres, aldehídos, cetonas y ácidos orgánicos, cuya generación está asociada a la actividad microbiana y a las transformaciones bioquímicas durante el almacenamiento y la fermentación (Clarke & Macrae, 1987; De Bruyn et al., 2017).

El perfil de compuestos volátiles (CV) de los granos de café verde influye significativamente en las características aromáticas de la bebida (Yang et al., 2016). Se han reportado cientos de compuestos volátiles en café verde y más de mil en café tostado. Al menos 30 compuestos volátiles son considerados esenciales para el aroma percibido en el café tostado (Zhang et al., 2022). Para el análisis de los compuestos volátiles y su relación con la calidad sensorial, se utilizan diversas técnicas analíticas (Casco et al., 2024). Una de las más comunes es la micro extracción en fase sólida en espacio de cabeza acoplada a cromatografía de gases-espectrometría de masas (HS-SPME/GC-MS) (Zhang et al., 2022). Esta técnica permite identificar y cuantificar los CV presentes en el café (Vezzulli et al., 2023).

El origen geográfico tiene un fuerte impacto en el perfil volátil, estos compuestos se forman de manera natural en los granos como resultado de la interacción de la planta con el ambiente, así como durante las etapas posteriores a la cosecha, tales como la remoción del mucílago y el secado (Chambers IV & Koppel, 2013). Al buscar vincular factores genéticos con los perfiles aromáticos del café de especialidad, enfocándose en la variedad Geisha, Marie et

al. (2024), compararon cuatro genotipos mediante análisis de compuestos volátiles usando HS-SPME/GC-MS, y análisis de expresión génica para estudiar la biosíntesis de terpenos, identificando compuestos volátiles clave como limoneno y ácido 3-metilbutanoico, asociados a notas afrutadas y florales del Geisha. Estos compuestos están directamente relacionados con una expresión génica específica, lo que demuestra que la genética varietal influye en el perfil aromático del café.

La composición química y los metabolitos volátiles de los granos de café verde varían según el origen geográfico. En Java occidental, usando HS-SPME y GC-MS en café robusta, identificaron 143 compuestos volátiles, mostrando que la temperatura y altitud tienen mayor influencia que otros factores climáticos. A altas temperaturas aumentan el ácido isovalérico, succinato de diisobutilo, 4-dodeceno, tolueno y ácido acético. A mayor precipitación aumentan el benzaldehído, 1-hepteno, cafeína y benzoato de metilo, mientras que a mayor altitud aumentan el benzoato de metilo y el 1-hepteno, pero se reducen el ácido isovalérico y el 4-dodeceno. Estas variaciones impactan la calidad sensorial y la diferenciación del café como especialidad, vinculándose estrechamente con el clima y la altitud del cultivo (Marwani et al., 2024). Por otro lado, Tsegay et al. (2019), evaluaron los compuestos volátiles en 31 muestras de café verde de dos regiones de Etiopía (Gedeo y Jimma) y su relación con la altitud de cultivo, identificando 81 compuestos, siendo los más abundantes trans-linaloolóxido, linalool, 2-metoxi-4-vinilfenol y cis-linaloolóxido. Otros compuestos importantes incluyeron benceno, acetaldehído, 2-heptanol y α -terpineol. Estos compuestos pertenecen a grupos como alcoholes, aldehídos y furanos. Se encontró que la altitud tiene una correlación débil con los compuestos volátiles, lo que sugiere que no influye significativamente en su perfil químico.

Kulapichitr et al. (2017) analizaron los compuestos volátiles de granos de café verde provenientes de frutos maduros e inmaduros, identificando más de 200 compuestos en ambos tipos de café. En el café inmaduro predominaban alcoholes y cetonas, pero sus concentraciones disminuyeron con la maduración, mientras que aumentaron aldehídos, ácidos y ésteres. Algunos compuestos volátiles fueron exclusivos del café maduro, como ciertos alcoholes, ésteres y compuestos aromáticos como el 1-hexanol, el 2-heptanol, el 2-etil-1-hexanol, el 2,2-dimetil-3-4-pentadienal, el hexanoato de metilo, el fenilacetato de metilo, el salicilato de metilo, el metil-(2E)-2-metil-2-butenato y la 2,7-dimetil-oxepina. Las diferentes vías de procesamiento para obtener cafés como el lavado, honey y natural influyen en la calidad y la composición química del café (Várady et al., 2022). En procesamiento vía húmeda, para la remoción del mucílago, la fermentación es un paso crucial que afecta la calidad del café (Aswathi et al., 2024). La inoculación con levaduras seleccionadas, como *Saccharomyces cerevisiae* y *Torulopsis delbrueckii*, puede modificar el perfil sensorial y mejorar las puntuaciones de la bebida (Evangelista et al., 2014). La fermentación puede generar ácidos orgánicos como el

ácido succínico (Batista da Mota et al., 2020). Aunque la fermentación produce cambios significativos en el perfil de compuestos volátiles del café, el beneficio ecológico también contribuye a modificar estas características (Joët et al., 2010). Al comparar los perfiles volátiles de granos de café verde sometidos a fermentación del mucílago con aquellos no fermentados, se identificaron 105 compuestos, incluyendo ácidos, alcoholes, aldehídos, alcanos, alquenos, compuestos aromáticos, ésteres, furanos, furanonas, cetonas, lactonas, fenoles, pirazinas, piridinas, pirroles, compuestos sulfurados y terpenos. Aunque no se detectaron diferencias significativas en el contenido total de compuestos volátiles tras la fermentación, sí se observaron variaciones en las concentraciones específicas de las distintas clases de compuestos (Wie et al., 2017). Tras la fermentación, los niveles de 2,3-butanediona y acetoina aumentaron considerablemente debido a su producción vía la ruta biosintética de la valina en las levaduras. Además, se registraron incrementos significativos en limoneno y α -terpineno, posiblemente por la formación de terpenos por levaduras como *Yersinia lipolytica* (Wie et al., 2017).

Wu et al. (2024) evaluaron las diferencias en compuestos volátiles y descriptores sensoriales entre café fermentado y no fermentado. Analizaron muestras de dos fincas australianas (Mountain Top y Kahawa), con cuatro niveles de tostado. El café tostado con nivel medio-oscuro mostró mayor intensidad en color, crema, retrogusto y notas de chocolate oscuro, tostado y mantequilla. Los compuestos volátiles que diferenciaron al café fermentado tostado fueron metilpirazina, 2-etil-5-metilpirazina y 2-etil-6-metilpirazina. Vezzulli et al. (2023) utilizaron HS-SPME/GC-MS para detectar compuestos volátiles en cafés verdes y tostados, a tres niveles, con el fin de evaluar cómo el origen, los procesos poscosecha y el tostado afectan la composición de los CV. En café verde, los compuestos volátiles discriminantes, como linalool y 2,3-butanediol, se asociaron principalmente al origen, siendo más abundantes en cafés naturales, mientras que hexanal predominó en variedades lavadas. En cafés tostados, las diferencias en compuestos volátiles dependieron principalmente del nivel de tostado, seguido por el origen y los procesos poscosecha. Dippon et al. (2022), identificaron 39 compuestos volátiles en el café tostado, entre ellos la 2-butanona, el furano, el 2-metilfurano, el formiato de metilo, la 2,3-pentanediona, la metilpirazina, el ácido acético, el furfural, el 5-metil furfural y el 2-furanmetanol, y definieron que contribuyen a distinguir variedades de café y las diferentes intensidades de tueste.

El objetivo de esta investigación fue evaluar el perfil de los compuestos volátiles (CV) de los granos de café provenientes de cambios en las etapas tradicionales del procesamiento húmedo, tales como frutos de café con diferentes estados de madurez asociados a la recolección tardía, demoras en el despulpado del fruto que establecen la categoría de cafés reservados, y la prolongación de la fermentación del mucílago con diferentes estados de madurez. Los frutos de café reservados son aquellos que tienen una espera previa

a su procesamiento y este tiempo de permanencia puede desarrollarse bajo diversas condiciones (bolsas plásticas, canastillas, tolvas y recipientes herméticos, algunos con inyección de dióxido de carbono).

Materiales y métodos

Muestras de café con diferentes estados de madurez

Se cosecharon ocho unidades de trabajo de 200 kg de frutos de café de la especie *Coffea arabica* L, variedad Castillo® de diferentes años y momentos de cosecha, se clasificaron hidráulicamente para eliminar los frutos de baja calidad y, posteriormente, se separaron en tres grados de madurez (Figura 1). El primer grado se definió como rojo anaranjado (EM1); el segundo como carmesí (EM2) y el tercero como rojo vino (EM3). La evaluación de los tratamientos se llevó a cabo con un análisis de medidas repetidas para un diseño de bloques completos aleatorios. El bloque correspondía a los diferentes momentos en los que se obtenía la unidad de trabajo. Después de la clasificación por estado de madurez, cada unidad de trabajo se procesó por vía húmeda, de la siguiente manera: en menos de seis horas de recolección, se retiró el exocarpio mediante una despulpadora horizontal 2.500, con tamiz circular (JM Estrada, Colombia). Luego, se eliminó el mucílago mediante desmucilaginado mecánico, finalizando con secado mecánico a una temperatura de 40°C hasta que el grano alcanzó un contenido de humedad entre 10,0% y 11,5%, para un total de 24 muestras (Tabla 1).

Frutos de café con reserva previa al procesamiento vía húmeda

El almacenamiento del fruto de café bajo diferentes condiciones utilizando, entre otros, bolsas plásticas, canastillas, tolvas y recipientes herméticos, en algunas ocasiones con inyección de dióxido de carbono, generando la categoría de cafés que en este estudio se denominan “reservados”, por su tiempo de espera antes de su procesamiento, se evaluó en un diseño experimental completamente aleatorio en arreglo factorial 2x2 para determinar el efecto de dos temperaturas (15°C y 20°C) y dos tiempos (24 y 48 horas) de reserva de frutos de café, en los tres estados de madurez (EM1, EM2 y EM3). Por estado de madurez se tomaron 80 kg y se dividieron en cuatro unidades experimentales de 20 kg, que se almacenaron en bolsas de polipropileno (estopa), las cuales se asignaron aleatoriamente a los tratamientos. De este modo se configuraron 12 tratamientos (R: reserva; EM: estado de madurez; T: temperatura en °C; t: tiempo de almacenamiento en horas) (Figura 1; Tabla 1). Tras la reserva de los frutos (tratamientos), las muestras de los 12 tratamientos se sometieron al beneficio húmedo en las mismas condiciones que los frutos sin retrasos en el beneficio. En esta etapa se obtuvieron un total de 96 muestras (Tabla 1).

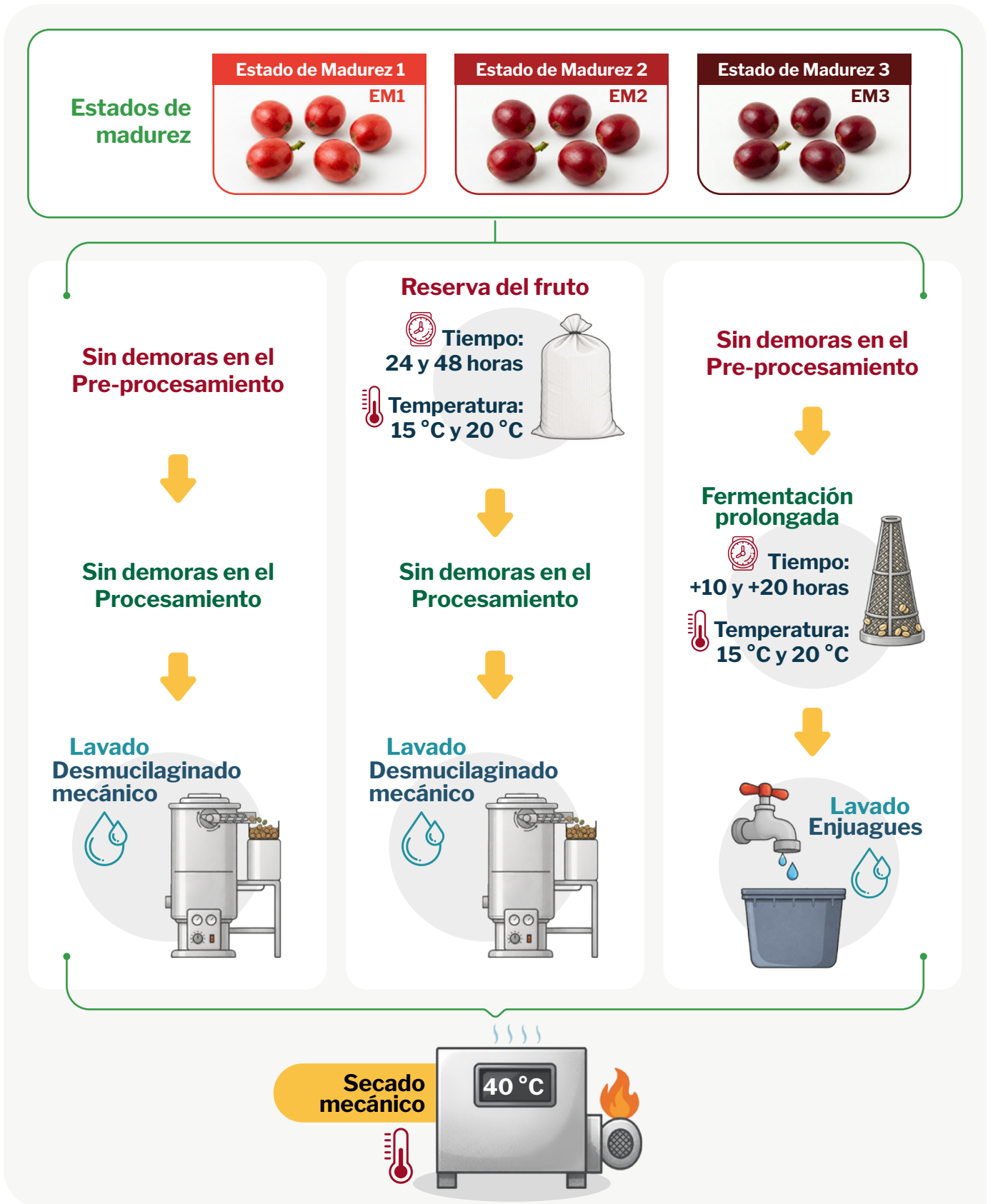


Figura 1. Metodología de las demoras durante el procesamiento de los frutos de café.

Tabla 1. Códigos de tratamientos.



Estados de madurez	EM1	EM2	EM3
Reserva del fruto (R) (Temp (T) 15 °C y 20 °C – tiempo (t) 24 y 48 h)	REM1T15t24	REM2T15t24	REM3T15t24
	REM1T15t48	REM2T15t48	REM3T15t48
	REM1T20t24	REM2T20t24	REM3T20t24
	REM1T20t48	REM2T20t48	REM3T20t48
Fermentación prolongada (F) (Temp (T) 15 °C y 20 °C – tiempo (t) 10 y 20 h)	FEM1T15t10	FEM2T15t10	FEM3T15t10
	FEM1T15t20	FEM2T15t20	FEM3T15t20
	FEM1T20t10	FEM2T20t10	FEM3T20t10
	FEM1T20t20	FEM2T20t20	FEM3T20t20

Frutos despulpados de café con prolongación de la fermentación del mucílago

Se seleccionaron hidráulicamente ocho unidades de trabajo de 400 kg de frutos cada una, para separar los frutos de baja calidad, y luego se separaron en tres grados de madurez. Una vez conformadas las unidades de trabajo por grado de madurez y despulpados los frutos con la máquina horizontal 2500 con tamiz circular (JM Estrada, Colombia), se tomaron 80 kg de café despulpado por grado de madurez y se dividieron para los cuatro tratamientos (20 kg), correspondientes al proceso de fermentación espontánea, a dos temperaturas, 15°C y 20°C, con dos tiempos de prolongación de la fermentación. La prolongación de la fermentación se estableció de la siguiente manera: el proceso de fermentación se monitorizó siguiendo la metodología Fermaestro™ (Peñuela et al., 2013). Tras el tiempo de finalización definido por este dispositivo, los granos continuaron el proceso de fermentación durante dos tiempos adicionales: 10 y 20 horas. De esta forma, se conformaron 12 tratamientos (F: fermentación; EM: estado de madurez; T: temperatura en °C; t: tiempo de extensión en horas): FEM1T15t10, FEM1T15t20, FEM1T20t10, FEM1T20t20, FEM2T15t10, FEM2T15t20, FEM2T20t10, FEM2T20t20, FEM3T15t10, FEM3T15t20, FEM3T20t10, FEM3T20t20 (Figura 1). Tras la fermentación, el café se lavó por remojo, se seleccionó y se secó a 40°C con una humedad comprendida entre el 10% y el 12%. En esta etapa se obtuvieron un total de 96 muestras (Tabla 1).

Volátiles

Extracción de compuestos volátiles del café verde molido mediante HeadSpace-SPME (HS-SPME)

Las muestras de café almendra verde (libre de defectos físicos) de cada tratamiento se dispusieron en recipientes

plásticos con una masa de aproximadamente 80 g de peso y fueron almacenadas a -20°C por un tiempo mínimo de 2,0 horas. Posteriormente, las muestras se sometieron a nitrógeno líquido, hasta el momento de la molienda criogénica. El molino utilizado fue el Retsch Centrifugal Grinding Mill Zm 200. Después de molidas, las muestras se almacenaron en congelación a -80°C en tubos Falcon de 50 mL, en un ultracongelador marca Thermo Scientific serie Forma 900, hasta su análisis. Las muestras de café almendra verde molido se llevaron a temperatura ambiente durante 60 minutos antes de tomar la muestra analítica para la extracción. Posteriormente y para la extracción de los CV por HS (Head Space – espacio de cabeza), se utilizó una fibra SPME de 75 µm de tipo carboxeno (CAR)/ poli(dimetilsiloxano) (PDMS) (Supelco Co., Bellefonte, PA, EE.UU.). Se colocó un gramo de café en viales de microextracción de 2,0 mL, cerrados herméticamente con tapas semáforo, lo que correspondía a un espacio de cabeza de 1/3. Los viales se colocaron durante 40 minutos en una plancha de calentamiento regulada a una temperatura de 40°C, para alcanzar el equilibrio termodinámico del espacio de cabeza de la muestra. A continuación, se extrajeron los compuestos volátiles colocando la fibra SPME en contacto con el espacio de cabeza durante 30 minutos a la temperatura de equilibrio. Para la desorción de compuestos, la fibra se colocó en el inyector GC calentado a 220°C durante 4 min.

Análisis HS-SPME/GC

Las muestras fueron analizadas en un cromatógrafo de gases Agilent 8860, con detector de masas 5977B, con una columna capilar DB-WAX (J&W scientific) de 50m de longitud con un diámetro de 250 µm, y ancho de película de 0,25 µm. La inyección se realizó en modo splitless, durante 4 min a 220°C. El espectrómetro de masas se utilizó en un intervalo de masas de 40 a 350 uma, a una velocidad de exploración de 2,89 exploraciones/s. La temperatura de la línea de transferencia fue de 220°C. El caudal de gas portador (Helio) fue de 1,2 mL min⁻¹. La temperatura del

horno fue de 40°C por dos minutos, con ascenso de una tasa de 7°C/min, hasta llegar a 130°C, conservando esta temperatura por un minuto para posteriormente ascender hasta 200°C a una tasa de 4°C/min, manteniendo esta temperatura por tres minutos. Los espectros de masas de cada uno de los picos separados y las corrientes iónicas totales se registran por medio del barrido automático de radiofrecuencia (2,2 scan/s) en el intervalo de masas m/z 41-350 uma, la temperatura de la fuente fue de 230°C. La ionización se llevó a cabo aplicando una energía de 70 eV en la cámara del espectrómetro de masas. La confirmación estructural de los espectros de masa de los compuestos volátiles presentes en la muestra fue realizada a partir de la comparación con las bases de datos (NIST2017). Los datos de cada compuesto identificado se expresaron en área normalizada.

Calidad sensorial

Cada tratamiento (27) contó con un total de ocho unidades de trabajo, para un total de 216 muestras. Para el análisis sensorial del café, se utilizó el protocolo de la Specialty Coffee Association (2004), con cinco catadores certificados Q-Grader por el CQI (Coffee Quality Institute). La metodología incluyó el protocolo de preparación de la muestra para el análisis: proporción de café/agua, tipo de molienda, temperatura y calidad del agua, además de temperaturas de análisis. Cada muestra fue preparada individualmente y en diferentes momentos asociados a la fecha de procesamiento de la unidad de trabajo. Por cada muestra, se prepararon un total de cinco tazas, y cada una fue analizada por cada catador, los datos de la muestra corresponden al promedio de las cinco evaluaciones realizadas. Las muestras fueron codificadas previa presentación de la sesión de catación y aleatorizadas. Los catadores registraron diez atributos de sabor del café, entre los que se encuentran: fragancia/aroma, sabor, sabor residual, acidez, cuerpo, balance, uniformidad, taza limpia, dulzor, puntaje del catador y defectos sensoriales. El puntaje total se configura por la sumatoria de los valores de los atributos positivos y restando el valor del defecto sensorial. Los atributos son evaluados por su nivel de calidad en una escala de 6,00 a 10,00 puntos con intervalos cada 0,25 puntos. Puntajes totales superiores a 80 puntos clasifican el café como de especialidad por calidad sensorial. Los catadores proporcionaron de manera libre los descriptores de sabor percibidos durante la evaluación sensorial. Posteriormente, estos descriptores fueron sistematizados y agrupados en categorías afines para facilitar su análisis. Dichas categorías se analizaron mediante la prueba Chi-cuadrado (χ^2), con el fin de evidenciar posibles cambios en el perfil de sabor entre las muestras, constituyendo así un análisis cualitativo complementario al análisis sensorial cuantitativo.

Análisis estadístico

La investigación se desarrolló en tres etapas: (i) evaluación de las características químicas y sensoriales del fruto de café en distintos estados de madurez; (ii) determinación del efecto de la temperatura y del tiempo de reserva de frutos

con diferentes estados de madurez sobre su composición química y calidad sensorial; y (iii) análisis de la influencia de las condiciones del proceso de fermentación prolongada en la composición química y la calidad sensorial. En cada etapa se evaluaron tres estados de madurez, lo que dio lugar a un total de 27 tratamientos: tres en la primera etapa, 12 en la segunda y 12 en la tercera. Cada tratamiento estuvo conformado por ocho unidades experimentales, para un total de 216 muestras analizadas.

Para cada estado de madurez, se realizó un análisis de varianza con las variables de respuesta (CV: niveles de los compuestos volátiles), correspondiente a un modelo de diseño experimental completamente aleatorizado en una disposición factorial 2x2 con un nivel de significación $\alpha=0,05$. Cuando el análisis de la varianza mostró el efecto de los tratamientos de reserva del fruto y fermentación prolongada (valor $p < 0,05$), se realizó la prueba de comparación múltiple de Duncan ($\alpha = 0,05$) en los tratamientos para identificar el efecto de las temperaturas y/o los tiempos adicionales de procesamiento en los compuestos volátiles. Adicionalmente y a partir de la información sobre compuestos volátiles, se implementó un análisis de agrupamiento jerárquico de variables con el objetivo de identificar estructuras internas en el conjunto de datos. Este enfoque permitió detectar grupos de compuestos altamente correlacionados entre sí, revelando patrones estructurales en la matriz de datos. Para cada uno de los grupos identificados se seleccionaron los compuestos representativos, con el fin de profundizar el análisis mediante técnicas multivariadas. Inicialmente, se construyó una matriz de correlación basada en el coeficiente de Pearson, la cual fue visualizada mediante un mapa de correlación con ordenamiento jerárquico, permitiendo identificar asociaciones significativas entre variables y revelar subestructuras dentro de cada clúster. Posteriormente, los datos fueron agrupados por tratamiento, y se calcularon los promedios de cada compuesto volátil seleccionado. Con esta información se implementó un Análisis de Componentes Principales (PCA), con el propósito de reducir la dimensionalidad del sistema y facilitar la visualización de la distribución de los tratamientos en el espacio multivariado. Los catadores proporcionaron de manera libre los descriptores de sabor percibidos durante la evaluación sensorial. Posteriormente, estos descriptores fueron sistematizados y agrupados en categorías afines para facilitar su análisis. Dichas categorías se analizaron mediante la prueba Chi-cuadrado (χ^2), con el fin de evidenciar posibles cambios en el perfil de sabor entre las muestras, constituyendo así un análisis cualitativo complementario al análisis sensorial cuantitativo.

Resultados y discusión

Estados de madurez

De los 48 CV encontrados (Tabla 2), 13 mostraron un incremento en el área normalizada por estado de madurez al pasar del estado EM1 al EM3. De estos compuestos, seis

corresponden al grupo de los alcoholes, dos a los aldehídos y dos a los ácidos. El ácido fórmico, hexanal, estireno y el acetato de metilo incrementaron su área en el estado de madurez EM3 con respecto al estado EM1 en 4,87; 3,29, 2,42 y 1,86 veces, respectivamente (Figura 2). El estireno y el acetato de metilo se caracterizan por tener sabores dulces y frutales (Burdock, 2016). Para los descriptores sensoriales del sabor asociado a las muestras evaluadas de los tres estados de madurez, los catadores identificaron 125 en total, los cuales fueron clasificados en los siguientes grupos: caramelo-dulce, chocolate, cítricos, especias, florales, frutales y frutos secos. Del total de los descriptores el 37,60% corresponde al grupo caramelo-dulce, el 24,80% al chocolate, el 16,80% al grupo de frutos secos entre los cuales

se encuentran sabores de nuez, avellana y almendras, pero no se observó una tendencia de descriptores específicos por estado de madurez. Otros compuestos que incrementaron el área normalizada por el estado de madurez fueron: 2-pentanol, ácido 3-metilbutanoico, 2-metilpropanal, furanona, 2-furanmetanol, 2,3-butanodiol, 1-propanol, 2-metilpropanol y el etanol (Figura 2). Por otro lado, ocho compuestos disminuyeron su área al incrementar el grado de madurez: 2-butanona, 2-butanol, butanol, 3-metilbutanol, 2-pentanal, 1-Pentanol, 1-hexanol y butirrolactona. Los CV 2-butanona, 3-metilbutanol y 2-pentanal, presentaron disminuciones porcentuales en su concentración en el EM3 con respecto al EM1 de 0,80; 0,26 y 0,27, respectivamente (Figura 2).

Tabla 2. Área normalizada de compuestos volátiles por estados de madurez del fruto.

Compuesto volátil	EM1	EM2	EM3	GRUPO
Ácido 3-metil-2-butenico	0,004	0,002	0,003	Ácidos
Ácido 3-metilbutanoico	0,029	0,016	0,027	Ácidos
Ácido acético	1,627	0,902	0,986	Ácidos
3-metil-2-buten-1-ol	0,001	0,001	0,001	Alcoholes
3-pentanol	0,010	0,006	0,012	Alcoholes
2-metilpropanol	0,498	0,611	0,664	Alcoholes
1-propanol	1,016	1,026	1,041	Alcoholes
2,3-butanodiol	2,336	2,905	3,844	Alcoholes
Etanol	76,119	73,967	80,841	Alcoholes
Butanol	0,001	0,000	0,000	Aldehídos
Propanal	0,008	0,006	0,009	Aldehídos
Furfural	0,008	0,005	0,010	Aldehídos
2-metilbutanal	0,047	0,041	0,044	Aldehídos
3-metilbutanal	0,055	0,041	0,053	Aldehídos
Acetaldehído	1,921	2,449	2,026	Aldehídos
2-pentanona	0,030	0,013	0,033	Cetonas
3-pentanona	0,036	0,022	0,035	Cetonas
Hidroxietilcetona	0,064	0,039	0,052	Cetonas
Acetona	4,414	3,943	4,180	Cetonas
Bisulfuro de metano	0,188	0,180	0,184	Compuestos azufrados
Hexil acetato	0,015	0,010	0,009	Esteres

Continúa...

... continuación.

Compuesto volátil	EM1	EM2	EM3	GRUPO
Acetato de etilo	3,133	2,579	2,701	Esteres
2-metilfurano	0,049	0,070	0,071	Furanos
Furano	0,050	0,061	0,061	Furanos
Tolueno	0,130	0,117	0,135	Hidrocarburos
Acetonitrilo	0,940	1,197	0,633	Nitrilos
2-metoxi-3-pirazina	0,028	0,039	0,031	Pirazina

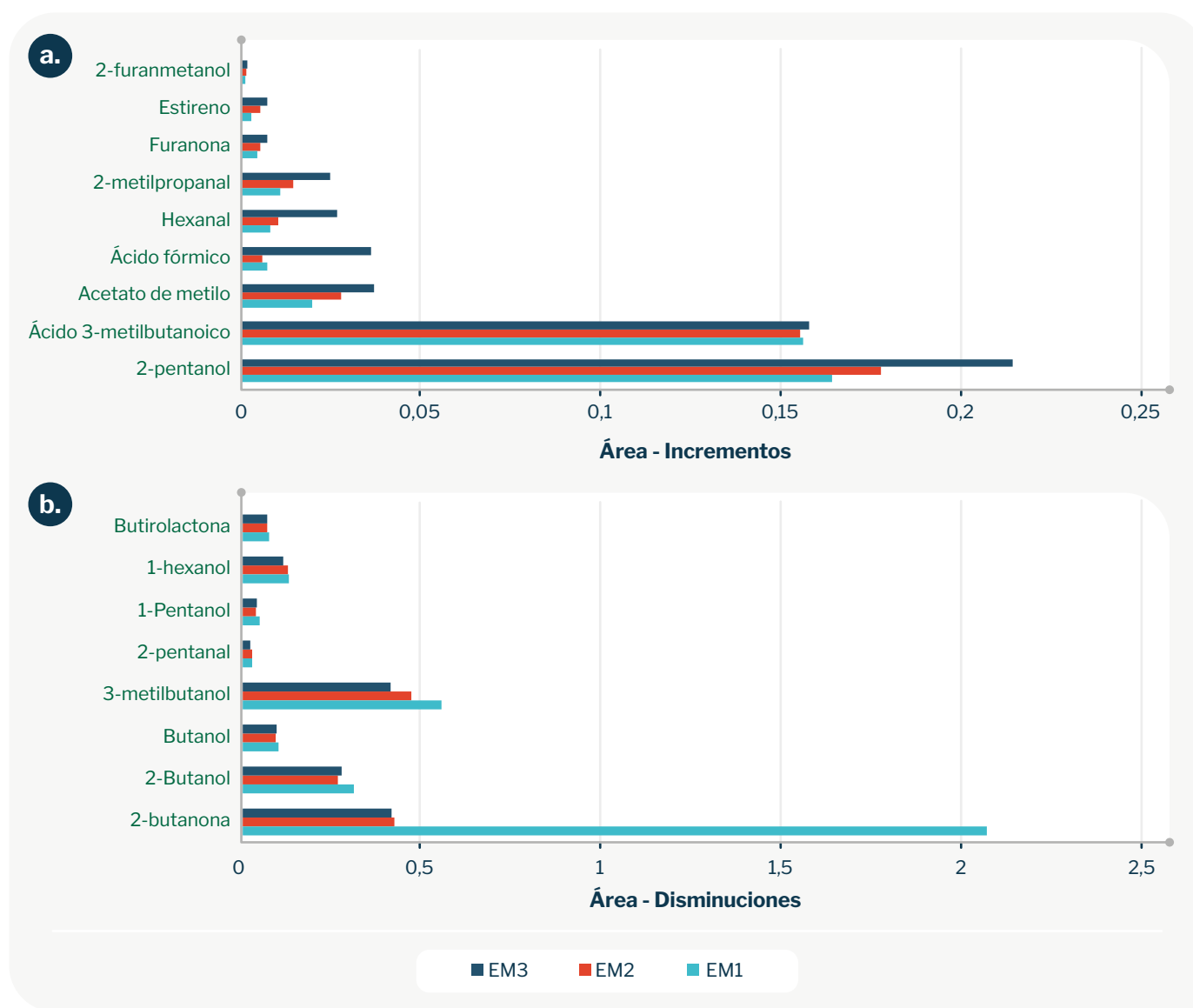


Figura 2. Incrementos (a) y disminuciones (b) en los compuestos volátiles por estados de madurez.

Reserva del fruto

El análisis de varianza para los CV no mostró efecto significativo de los tratamientos de reserva en el estado de madurez EM1 ($p = 0,13$). En el caso del estado de madurez EM2 (Tabla 3), se observó un efecto significativo ($p < 0,05$) en los compuestos 2-butanona, acetato de etilo, ácido acético y etanol, particularmente en los tratamientos con reserva del fruto desarrollado a una temperatura de 20°C durante 48 horas, según la prueba de comparación múltiple de Duncan ($\alpha = 0,05$). Por su parte, en el estado de madurez EM3 (Tabla 4) se evidenció un efecto significativo en los tres últimos compuestos mencionados, también asociado a los tratamientos con 20°C y 48 horas de reserva, al igual que el EM2.

El dendrograma obtenido a partir del análisis de los CV de granos de café provenientes de muestras con reserva del fruto permitió identificar cuatro clústeres principales (Figura 3). El primer clúster está conformado por el puntaje total SCA (Specialty Coffee Association, 2004), 3-pentanol, acetato de metilo, 2-butanona, acetato de etilo, ácido acético y etanol. Los cinco primeros compuestos volátiles mostraron incrementos en su área normalizada, reflejados en una mayor área en el cromatograma, mientras que el etanol disminuyó, en comparación con los tres estados de madurez sin reserva del fruto (Tabla 3).

Tabla 3. Valores de área normalizada de los compuestos volátiles EM2 con reserva de fruto.

2-Butanona			Acetato de etilo		
Promedio	Desvest	Tratamiento	Promedio	Desvest	Tratamiento
8,47 (A)	0,37	EM2T20t48	12,59 (A)	0,15	EM2T20t48
2,45 (B)	0,23	EM2T15t48	5,88 (B)	0,61	EM2T15t48
1,68 (B)	0,64	EM2T20t24	3,48 (B)	0,36	EM2T20t24
0,42 (B)	0,26	EM2	2,57 (B)	0,71	EM2
0,36 (B)	0,22	EM2T15t24	2,39 (B)	0,31	EM2T15t24
Etanol			Ácido acético		
Promedio	Desvest	Tratamiento	Promedio	Desvest	Tratamiento
81,41 (A)	2,61	EM2T15t24	7,57 (A)	0,81	EM2T20t48
75,78 (A)	3,55	EM2T20t24	3,65 (B)	0,52	EM2T15t48
73,96 (A)	3,25	EM2	1,97 (B)	0,21	EM2T20t24
69,22 (A)	2,52	EM2T15t48	1,17 (C)	0,19	EM2T15t24
54,41 (B)	2,11	EM2T20t48	0,91 (C)	0,12	EM2

Letras no comunes implica diferencia de promedios según prueba de Duncan al 5%.

Tabla 4. Valores de área normalizada de los compuestos volátiles EM3 con reserva de fruto.

Acetato de etilo			Etanol			Ácido acético		
Promedio	Desvest	Tratamiento	Promedio	Desvest	Tratamiento	Promedio	Desvest	Tratamiento
16,83 (A)	0,96	EM3T20t48	80,84 (A)	2,89	EM3	11,57 (A)	1,64	EM3T20t48
12,75 (A)	0,83	EM3T15t48	73,21 (A)	1,25	EM3T20t24	6,55 (B)	1,21	EM3T15t48
5,21 (B)	0,75	EM3T20t24	72,89 (A)	2,11	EM3T15t24	2,91 (C)	0,73	EM3T15t24
4,24 (B)	0,61	EM3T15t24	48,06 (B)	1,94	EM3T20t48	2,58 (C)	0,86	EM3T20t24
2,71 (B)	0,65	EM3	46,26 (B)	1,91	EM3T15t48	0,98 (C)	0,32	EM3

Letras no comunes implica diferencia de promedios según prueba de Duncan al 5%.

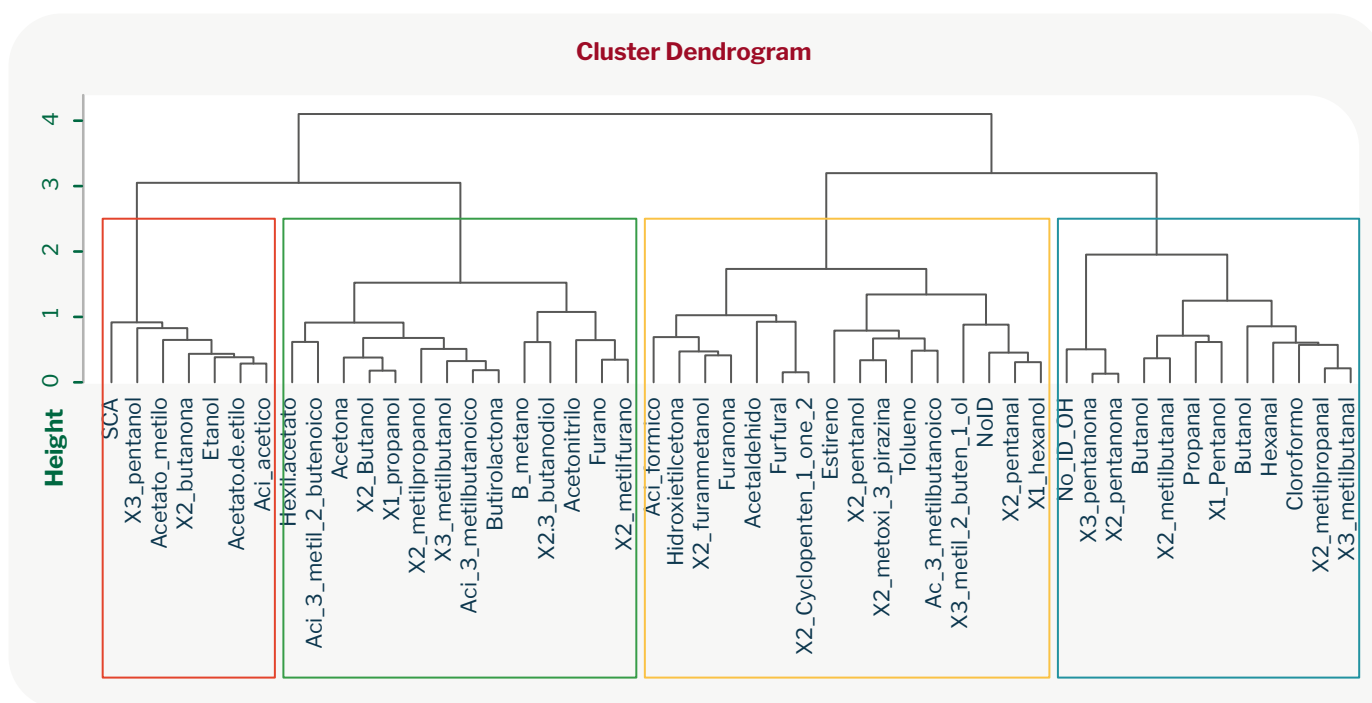


Figura 3. Dendrograma de los compuestos volátiles con reserva del fruto.

Los mayores incrementos en la concentración se presentaron para los compuestos 3-pentanol, acetato de metilo, 2-butanona, acetato de etilo y ácido acético, que se observaron en el tratamiento EM3T20t48, en comparación con el estado de madurez EM3, con aumentos de 2,75; 2,62; 24,55; 6,23 y 11,74 veces, respectivamente (Tabla 5). Los valores del área normalizada cromatográfica se incrementaron de la siguiente manera: el 3-pentanol

pasó de 0,01 a 0,03; el acetato de metilo, de 0,02 a 0,05; la 2-butanona, de 0,41 a 10,14; el acetato de etilo, de 2,71 a 16,83; y el ácido acético, de 0,98 a 11,57. Por otro lado, el etanol fue el único compuesto dentro de este clúster que mostró una tendencia a disminuir su área en todos los tratamientos con reserva del fruto. La mayor reducción se presentó precisamente en el tratamiento EM3T20t48, donde los demás compuestos del clúster aumentaron. En

este caso, el área del etanol fue de 48,06, lo que representa un porcentaje de disminución del 40,54% con respecto al valor inicial del estado de madurez EM3 (80,84). Esta reducción podría explicarse por la reacción entre el ácido acético y el etanol para la formación de acetato de etilo, un compuesto característico de procesos de crianza oxidativa en vinos y que en este mismo tratamiento evidenció un incremento en su valor. En la matriz de correlación basada en el coeficiente de Pearson, la cual fue visualizada mediante gráfico de ordenamiento jerárquico (**Figura 2**), se identificó el mínimo valor de asociación entre variables etanol y acetato de etilo (-0,41) y el máximo de este último CV con el ácido acético (0,71) corroborando la asociación anteriormente mencionada.

Algunos CV presentaron disminuciones en su concentración asociadas a las distintas condiciones de reserva del fruto, en comparación con el estado de madurez sin reserva. Entre ellos se encuentran la acetona, el 1-propanol y el acetonitrilo (**Figura 4**). La acetona, en particular, ha sido descrita sensorialmente como un compuesto de carácter dulce, mientras que el 1-propanol como afrutado y al acetonitrilo se le han atribuido notas olfativas que evocan geranio, rosa o pomelo, según lo reportado por Sarghini et al. (2019). Estas características sensoriales podrían influir en el perfil final de la bebida. Por otra parte, además de los compuestos incluidos en el clúster 1 que mostraron incrementos bajo ciertas condiciones

de reserva, se identificó un aumento en el 2,3-butanodiol. Este compuesto, producto de procesos fermentativos, también contribuye a las propiedades sensoriales del café, y su presencia en mayores concentraciones podría estar relacionada con una mayor actividad microbiana inducida por las condiciones específicas de temperatura y tiempo durante la reserva del fruto.

En resultados del análisis de CV para predecir el origen geográfico del café, se identificaron tres pirazinas: 2-etil-5-metilpirazina, 2,5-dimetilpirazina y 2-etil-3-metilpirazina, como los compuestos más relevantes, seguidas por la 3-etilpiridina, la acetoxiacetona, el guayacol, la etilpirazina y el 2-furanmetanol, en el modelo propuesto por Caporaso et al. (2018). Sin embargo, el 2,3-butanodiol se destacó con respecto a compuestos como la acetona y el acetonitrilo, pues este compuesto, derivado de procesos fermentativos, es un potente odorante que puede tener un impacto significativo en el perfil sensorial del café, y su alta variabilidad sugiere una influencia notable en la percepción aromática de cada grano (De Bruyn et al., 2017). Su variabilidad dentro de las muestras analizadas y para todos los compuestos analizados, refuerza su valor para la trazabilidad y diferenciación del origen. Su comportamiento lo posiciona como un marcador clave tanto para el estudio del aroma como para la comprensión de las variaciones naturales que afectan la estandarización sensorial del café (Caporaso et al., 2018).

Tabla 5. Valores de área normalizada de los compuestos volátiles asociados al puntaje SCA en la reserva del fruto.

Tratamiento	Acetato de metilo	Acetato de etilo	2-butanona	Etanol	3-pentanol	Butanol	Ácido acético
EM1	0,020	3,133	2,067	76,119	0,010	0,099	1,627
EM1T15t24	0,037	3,872	0,612	72,947	0,012	0,197	3,538
EM1T15t48	0,041	5,287	1,549	74,405	0,016	0,155	2,021
EM1T20t24	0,048	6,238	0,349	78,280	0,021	0,121	0,964
EM1T20t48	0,053	10,207	4,172	60,950	0,021	0,111	6,158
EM2	0,028	2,579	0,420	73,967	0,006	0,091	0,902
EM2T15t24	0,031	2,396	0,369	81,404	0,005	0,110	1,170
EM2T15t48	0,040	5,886	2,459	69,227	0,009	0,111	3,658
EM2T20t24	0,049	3,483	1,683	75,787	0,003	0,142	1,972
EM2T20t48	0,066	12,596	8,477	54,417	0,015	0,091	7,573

Continúa...

... continuación.

Tratamiento	Acetato de metilo	Acetato de etilo	2-butanona	Etanol	3-pentanol	Butanol	Ácido acético
EM3	0,037	2,701	0,413	80,841	0,012	0,092	0,986
EM3T15t24	0,039	4,246	2,306	72,891	0,010	0,147	2,904
EM3T15t48	0,052	12,751	7,784	46,269	0,024	0,158	6,557
EM3T20t24	0,037	5,215	1,732	73,204	0,020	0,150	2,580
EM3T20t48	0,097	16,833	10,141	48,065	0,033	0,083	11,579

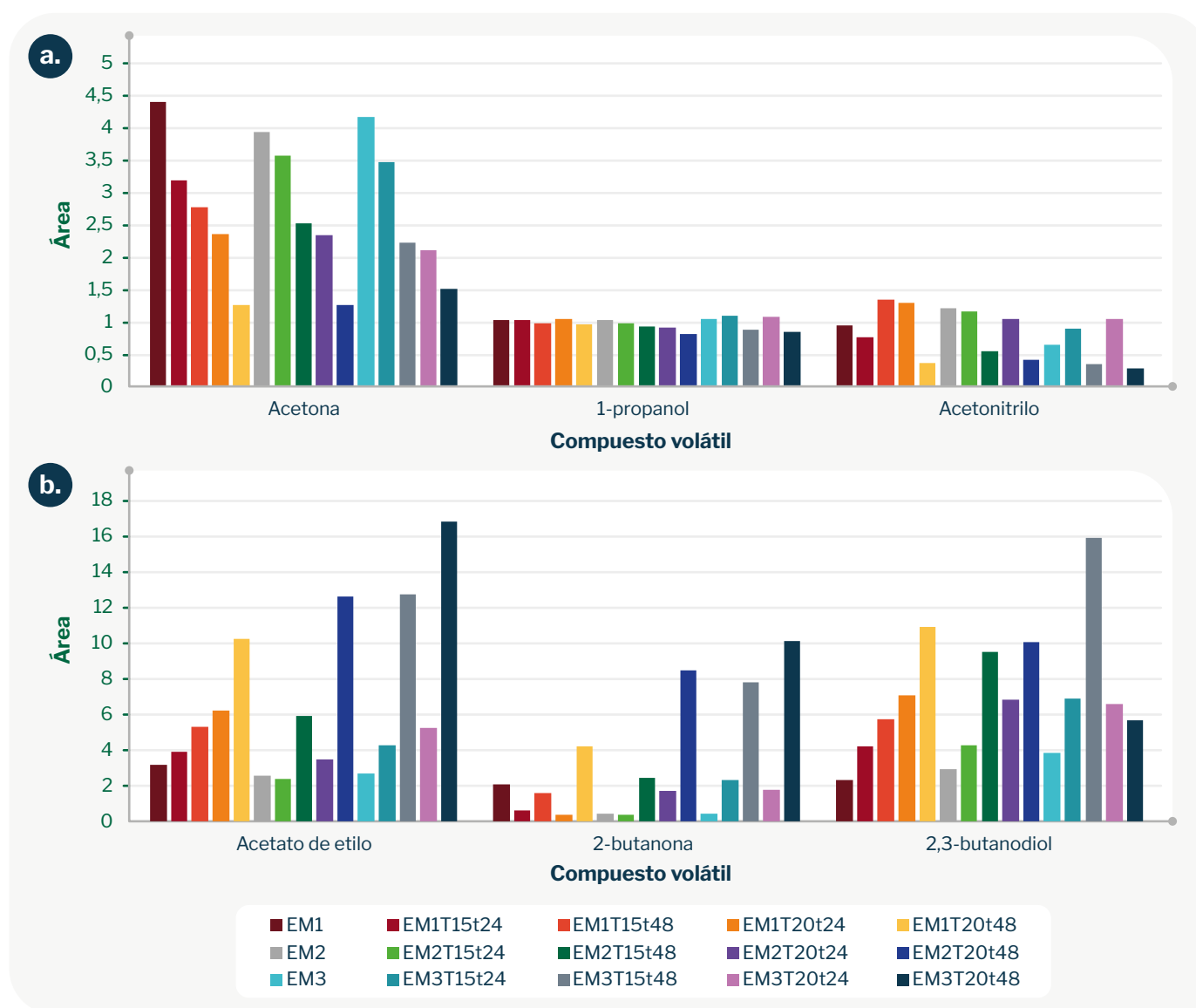


Figura 4. Disminuciones (a) e incrementos (b) del área normalizada de compuestos volátiles en el grano con reserva de fruto.

En las muestras provenientes de la reserva del fruto, los catadores identificaron 421 descriptores sensoriales del sabor que fueron clasificados en ocho categorías: caramelo-dulce, frutales (maracuyá, piña, durazno, melón, entre otros), chocolate, frutos secos, frutos rojos, especias, cítricos y florales. La frecuencia de descriptores del grupo dulces disminuyó en los tratamientos asociados a los diferentes estados de madurez pasando del 39,28%, al 35,00% y al 25,71% en EM1, EM2 y EM3, respectivamente. Los grupos de los frutos secos y los frutales aumentaron su frecuencia de 46,00% al 54,00% y del 46,66% al 53,33% al aumentar la temperatura del proceso de 15°C a 20°C, mientras que los frutos rojos disminuyeron del 61,70% al 38,29%. El aumento del tiempo de reserva de 24 a 48 horas evidenció su disminución en la frecuencia de descriptores de los grupos caramelo-dulce y chocolate con reducción de valores del 53,57% al 46,42% y del 58,82% al 41,17%, respectivamente. Un comportamiento opuesto, mostraron los descriptores de los grupos frutales y frutos rojos, pues aumentaron sus valores del 33,33% al 66,66% y del 34,04% al 65,95%, respectivamente. Yusianto & Nugroho (2014), reportaron que el carácter de sabor floral y especiado predomina en el café almacenado en tiempos inferiores a cuatro días, después de este tiempo se detectan sabores herbales y hacia los siete días defectos de sabor. A partir de la prueba Chi-cuadrado (χ^2) a un nivel de significancia del 5%, no existe evidencia estadística suficiente para concluir que la distribución de la proporción de muestras clasificadas en cada una de las categorías de los descriptores sea diferente por estado de madurez ($p = 0,56$) y temperatura de reserva ($p = 0,44$). En cuanto al tiempo de reserva, la distribución de la proporción de muestras difiere en las categorías frutales, frutos rojos y frutos secos, puesto que con mayor tiempo de almacenamiento ($p < 0,05$), se presentó un mayor número de muestras en las dos primeras categorías, pero una menor proporción en la tercera.

El análisis de componentes principales (ACP) de los CV y los descriptores, muestra que los tres primeros componentes explican el 89% de la variabilidad acumulada (Figura 5). El primer componente (PC1) está fuertemente influenciado por acetato de etilo (16,82%), ácido acético (16,61%), 2-butanona (15,68%) y etanol (15,26%), lo cual sugiere que estos compuestos son clave en la diferenciación entre tratamientos en esta dimensión. En este componente, el tratamiento EM3T20t48 domina con una alta contribución (43,68%), seguido por EM3T15t48 (9,93%), indicando que el tiempo está asociado con una mayor presencia de estos compuestos volátiles clave.

Fermentación prolongada

El análisis de varianza para los CV mostró efecto significativo para la acetona en los tratamientos con diferente temperatura y prolongación del tiempo de fermentación en el estado de madurez EM1. En el caso del estado de madurez EM2, se observó un efecto significativo ($p < 0,05$) en el 2 -metilbutanal (Tabla 6). Por su parte, en el estado de madurez EM3 se evidenció un efecto en los CV: acetaldehído, hexanal, acetona, acetato de etilo,

2-metilpropanol, 1-hexanol, ácido 3-metilbutanoico y el ácido acético (Tabla 7). Para el EM1 se diferencia el estado de madurez sin fermentación prolongada del mucílago del tratamiento con temperatura de 20°C y prolongación de 20 horas, disminuyendo de 4,41 a 0,90. Para el EM2 el 2-metilbutanal también presenta disminuciones y se diferencian los tratamientos EM2T15t10 y EM2T20t20 de los tratamientos EM2 y EM2T20t10.

En los tratamientos asociados al estado de madurez más avanzado EM3 el menor valor de acetaldehído se encontró en el estado de madurez sin fermentación y aumentó de 2,02 a 4,11 en el tratamiento EM3T20t20, estos dos valores son estadísticamente diferentes. El hexanal en el EM3T20t20 fue distinto de los demás tratamientos (Tabla 7). A diferencia de los dos compuestos anteriores, el EM3 sin fermentación de mucílago presentó máximos valores de acetona y este estado de madurez se diferenció de los tratamientos con temperatura de proceso de 20°C y los dos tiempos adicionales de 10 y 20 horas. El acetato de etilo presentó un comportamiento similar al acetaldehído; su mayor concentración se evidenció en el EM3T20t20 y este compuesto volátil se diferenció de los demás tratamientos. El 2-metilpropanol incrementó a medida que aumentaron las horas de prolongación de fermentación y el tratamiento EM3T20t20 fue el que presentó el valor máximo y se diferenció de los demás tratamientos. El 1-hexanol mostró un comportamiento igual que la acetona y el máximo valor se reportó en el EM3. Los tratamientos con temperatura de 20°C y con tiempos de fermentación de 10 y 20 horas presentaron los valores máximos de ácido 3-metilbutanoico y se diferenciaron de los tratamientos sin fermentación prolongada y de los tratamientos desarrollados a una temperatura de 15°C. Similar para el ácido acético los valores máximos se encontraron en los mismos tratamientos anteriormente mencionados y el mínimo valor en el EM3 sin fermentación prolongada.

El análisis del dendrograma obtenido a partir del análisis de los CV de granos de café provenientes de muestras con fermentación prolongada permitió identificar cuatro clústeres principales (Figura 6). El segundo clúster está conformado, entre otros, por el puntaje total SCA 2004 (Specialty Coffee Association), 3-pentanol, 2-butanona, acetato de etilo, ácido acético, etanol, hexanal y el ácido 3-metilbutanoico. De los compuestos volátiles que hacen parte del clúster, los mayores incrementos en la concentración se observaron en los compuestos acetaldehído, 2-metilpropanol, acetato de etilo, 2-butanona, ácido 3-metilbutanoico, hexanal y el ácido acético (Tabla 8). Para el acetaldehído los mayores incrementos se observaron en los tratamientos asociados a la temperatura de proceso de 20°C y 20 horas de prolongación de la fermentación del mucílago con respecto al estado de madurez sin este proceso. Los incrementos en este tratamiento para los estados de madurez EM1, EM2 y EM3 fueron de 0,54; 0,46 y 1,03. Por su lado, el CV 2-metilpropanol en el EM2 aumentó 9,04 veces su valor en el tratamiento con temperatura de 15°C y 20 horas adicionales. Para el acetato de etilo, 2-butanona, ácido

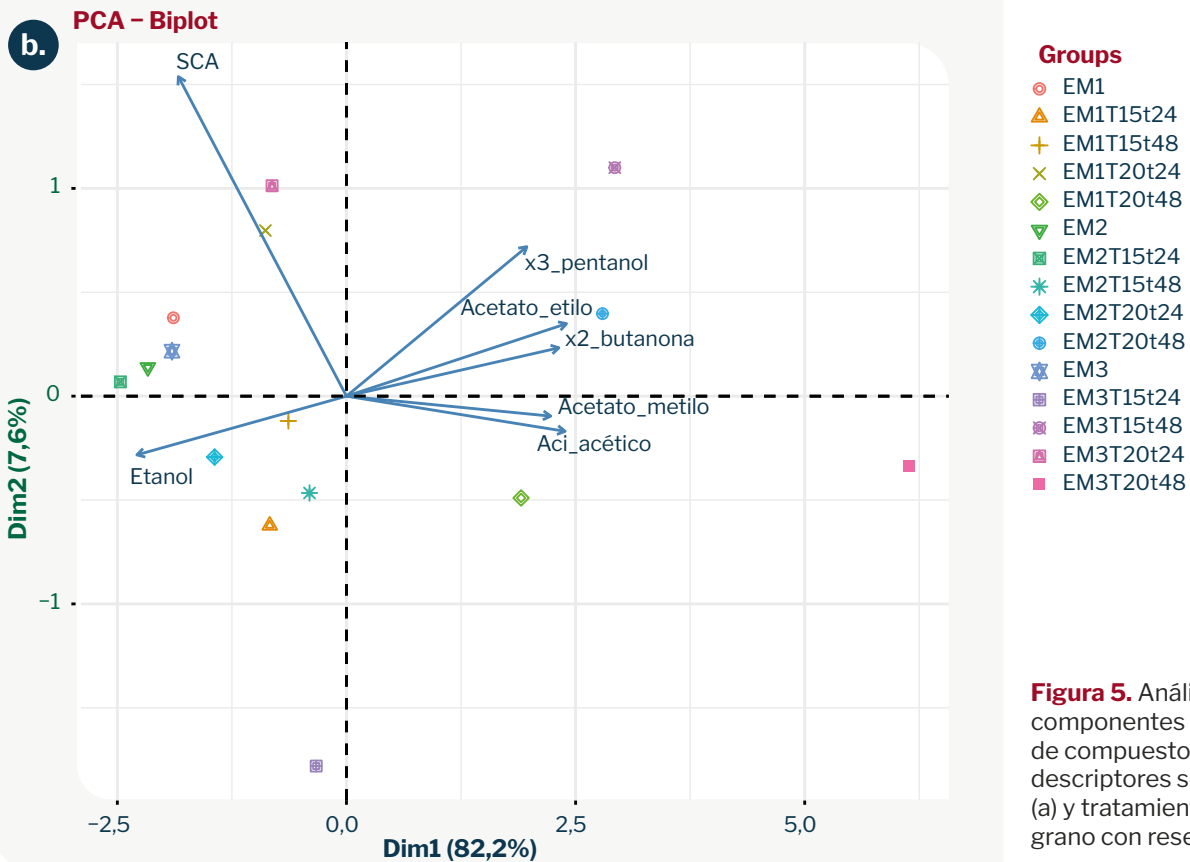
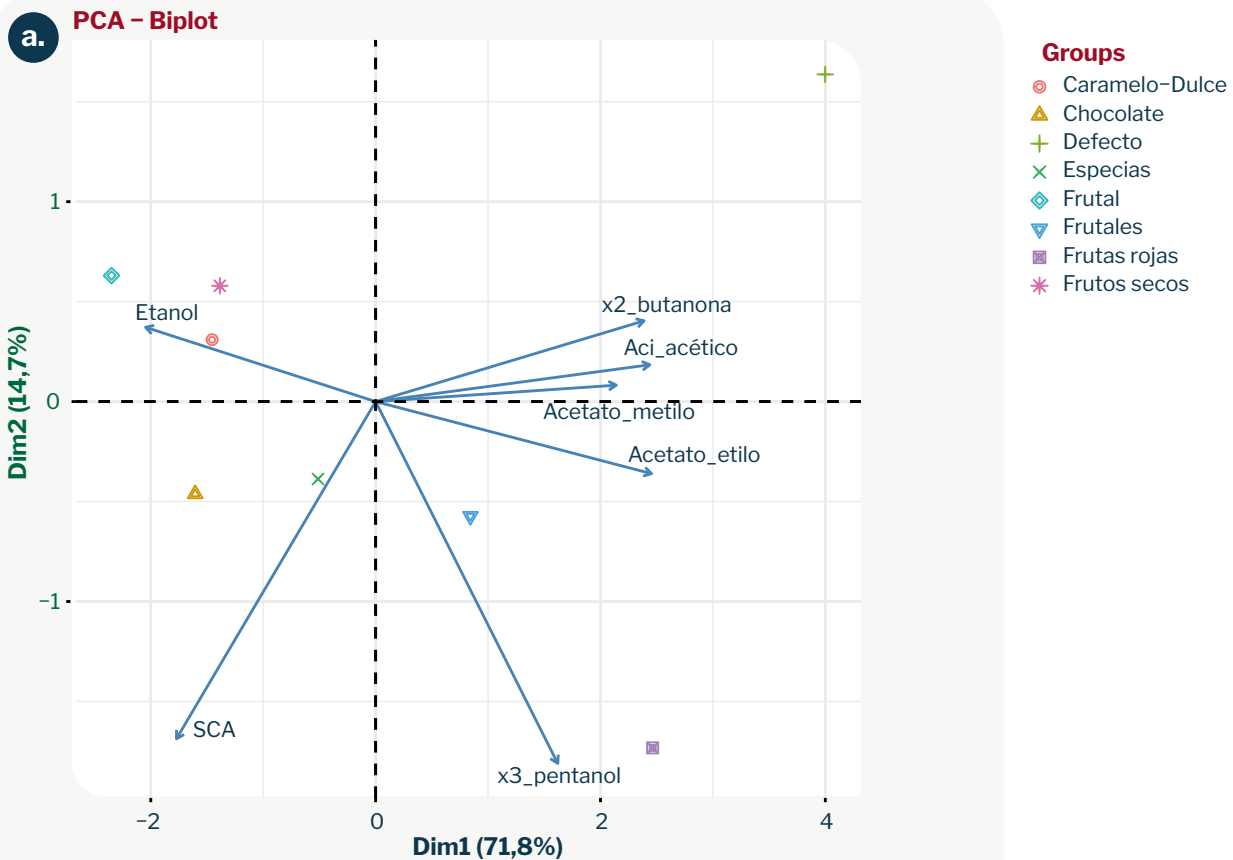


Figura 5. Análisis de componentes principales de compuestos volátiles y descriptores sensoriales (a) y tratamientos (b) en el grano con reserva de fruto.

3-metilbutanoico, hexanal y el ácido acético presentaron los máximos valores en el tratamiento EM3T20t20, estos CV mostraron incrementos en su concentración, reflejados en una mayor área en el cromatograma, en 3,47; 14,16; 6,37; 9,27 y 4,32 veces con respecto al tratamiento EM3.

El análisis de componentes principales (ACP), que se presenta en la **Figura 7**, muestra que los tres primeros componentes explican el 70,21% de la variabilidad acumulada. El primer componente (PC1) está fuertemente influenciado por el ácido-3-metilbutanoico (10,96%), 2-butanona (10,87%), puntaje total SCA 2004 (10,68%), acetaldehído (9,86%) y hexanal (8,84%), lo cual sugiere

que estos compuestos son clave en la diferenciación entre tratamientos en esta dimensión. En este componente, el tratamiento EM2T20t20 domina con una alta contribución (55,94%), indicando que la combinación de estado de madurez, temperatura y tiempo están asociadas con una mayor presencia de estos compuestos volátiles clave. En conjunto, el ACP no solo revela qué compuestos discriminan mejor los tratamientos, sino que también permite vincular perfiles volátiles específicos con condiciones particulares, como el tratamiento EM3T20t20, que muestra un perfil muy definido en el segundo componente, posiblemente relacionado con la generación de defectos sensoriales como el fermento.

Tabla 6. Compuestos volátiles de los estados EM1 y EM2 con fermentación prolongada de mucílago.

EM1 Acetona			EM2 2-metilbutanal		
Promedio	Desvest	Tratamiento	Promedio	Desvest	Tratamiento
4,41 (A)	0,88	EM1	0,13 (A)	0,01	EM2T15t10
3,67 (BA)	0,85	EM1T15t10	0,12 (A)	0,01	EM2T15t20
2,81 (B)	0,54	EM1T15t20	0,08 (BA)	0,00	EM2T20t20
2,38 (BC)	0,69	EM1T20t210	0,04 (B)	0,00	EM2
0,90 (C)	0,16	EM1T20t20	0,02 (B)	0,00	EM2T20t10

Letras no comunes implica diferencia de promedios según prueba de Duncan al 5%.

Tabla 7. Valores de área normalizada de los compuestos volátiles EM3 con fermentación prolongada de mucílago.

Acetaldehído			Hexanal		
Promedio	Desvest	Tratamiento	Promedio	Desvest	Tratamiento
4,11 (A)	0,98	EM3T20t20	0,24 (A)	0,01	EM3T20t20
3,99 (A)	0,85	EM3T20t10	0,04 (B)	0,00	EM3T20t10
3,05 (BA)	0,54	EM3T15t20	0,02 (B)	0,00	EM3
2,31 (B)	0,69	EM3T15t10	0,01 (B)	0,00	EM3T15t10
2,02 (B)	0,71	EM3	0,004 (B)	0,00	EM3T15t20

Continúa...

... continuación.

Acetona			Acetato de etilo		
Promedio	Desvest	Tratamiento	Promedio	Desvest	Tratamiento
4,17 (A)	0,97	EM3	9,38 (A)	0,45	EM3T20t20
3,12 (BA)	0,88	EM3T15t10	5,04 (B)	0,51	EM3T20t10
2,07 (BC)	0,64	EM3T15t20	4,03 (B)	0,56	EM3T15t20
1,64 (C)	0,49	EM3T20t10	3,37 (B)	0,71	EM3T15t10
0,84 (C)	0,17	EM3T20t20	2,71 (B)	0,22	EM3
2-metilpropanol			1-hexanol		
Promedio	Desvest	Tratamiento	Promedio	Desvest	Tratamiento
1,64 (A)	0,31	EM3T20t20	0,11 (A)	0,01	EM3
1,09 (B)	0,23	EM3T15t20	0,09 (A)	0,00	EM3T15t10
0,92 (B)	0,16	EM3T20t10	0,05 (B)	0,00	EM3T15t20
0,86 (B)	0,09	EM3T15t10	0,05 (B)	0,00	EM3T20t10
0,66 (B)	0,09	EM3	0,04 (B)	0,00	EM3T20t20
Ácido 3-metilbutanoico			Ácido acético		
Promedio	Desvest	Tratamiento	Promedio	Desvest	Tratamiento
0,81 (A)	0,11	EM3T20t20	4,25 (A)	0,64	EM3T20t20
0,40 (B)	0,12	EM3T20t10	3,51 (A)	0,21	EM3T20t10
0,22 (C)	0,01	EM3T15t10	2,49 (B)	0,53	EM3T15t20
0,15 (C)	0,01	EM3	1,31 (C)	0,26	EM3T15t10
0,14 (C)	0,01	EM3T15t20	0,98 (C)	0,22	EM3

Letras no comunes implica diferencia de promedios según prueba de Duncan al 5%.

Tabla 8. Valores de área normalizada de compuestos volátiles asociados al puntaje SCA en fermentación prolongada del mucílago.

Tratamiento	Acetato de etilo	2-butanona	Etanol	Ácido 3-metilbutanoico	Hexanal	3-pentanol	Ácido acético
EM1	1,883	2,067	76,119	0,029	0,008	0,010	1,627
EM1T15t10	2,065	0,504	81,857	0,035	0,019	0,007	2,195
EM1T15t20	2,644	0,953	76,069	0,044	0,058	0,002	1,752

Continúa...

... continuación.

Tratamiento	Acetato de etilo	2-butanona	Etanol	Ácido 3-metilbutanoico	Hexanal	3-pentanol	Ácido acético
EM1T20t10	4,064	0,414	77,224	0,077	0,008	0,007	2,050
EM1T20t20	5,841	1,501	66,200	0,186	0,010	0,010	3,324
EM2	2,579	0,420	73,967	0,030	0,010	0,006	0,902
EM2T15t10	3,350	0,610	66,234	0,080	0,016	0,015	4,903
EM2T15t20	4,016	1,181	72,896	0,114	0,017	0,007	1,784
EM2T20t10	4,300	0,401	78,657	0,045	0,008	0,007	1,388
EM2T20t20	7,069	3,865	69,164	0,140	0,008	0,008	2,970
EM3	2,701	0,413	80,841	0,040	0,027	0,012	0,986
EM3T15t10	3,375	1,240	81,875	0,112	0,014	0,009	1,310
EM3T15t20	4,035	2,043	76,032	0,028	0,005	0,015	2,492
EM3T20t10	5,043	2,430	65,630	0,194	0,040	0,009	3,519
EM3T20t20	9,389	5,842	66,265	0,256	0,248	0,020	4,258

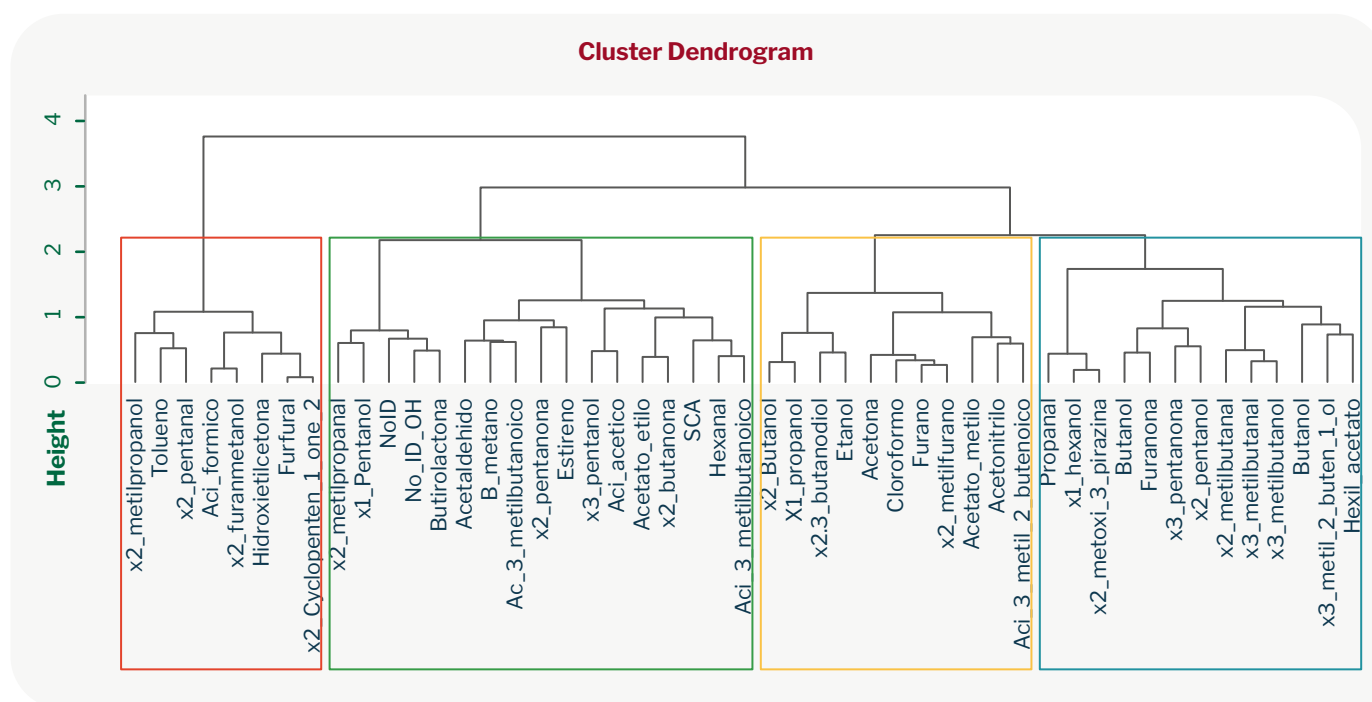


Figura 6. Dendrograma compuestos volátiles de fermentación prolongada del mucílago.

El análisis de varianza de las variables del perfil sensorial mostró efecto en los tratamientos del estado de madurez EM3. Aumentar el tiempo de prolongación de 10 a 20 horas generó efecto en el atributo acidez, disminuyendo de 7,26 a 6,79. Aumentar la temperatura del proceso de fermentación del mucílago con frutos del estado de madurez EM3, que fue el estado más avanzado evaluado, evidenció un efecto negativo, pues se generó una disminución de los puntajes de cinco atributos de los 11 evaluados. La temperatura del proceso tuvo efecto en los atributos de fragancia/aroma, sabor residual, acidez, balance y puntaje de catador; al reducir sus valores de 7,62 a 7,40; 7,31 a 6,60; 7,41 a 6,65; 7,36 a 6,62 y 7,36 a 6,63, respectivamente. Estas disminuciones están asociadas a los valores obtenidos en el tratamiento EM3T20t20 que se encuentran en el segmento más bajo de la escala de evaluación por presentar defectos sensoriales. La interacción de la temperatura del proceso (15°C y 20°C) con el tiempo de prolongación de la fermentación (10 y 20 horas) presentó efecto en los atributos sabor, taza limpia y puntaje total SCA.

El estado de madurez del café es una condición determinante en la fermentación, pues se observó que estados como el EM3 donde el contenido de mucílago es inferior con respecto al estado de madurez EM1, pueden generar de manera consistente un efecto negativo en la calidad al originar defectos como el fermento. Según lo reportado por Avallone et al. (2001), la microflora inicial de la fermentación es abundante y variada; la aeróbica es predominante y más heterogénea cuando se tienen mayores contenidos de agua en el proceso. Las condiciones ácidas prevalecientes al final de la fermentación favorecen el desarrollo de las levaduras y estas podrían ser las responsables del sabor alcohólico de la bebida de café tras la sobrefermentación. En el caso del estado de madurez EM3, un menor contenido de mucílago de 10,07% en comparación con el estado de EM1 con un valor de 15,44%, explicado por un menor contenido de agua asociado a la deshidratación que sufre el fruto en las últimas etapas de la maduración, podría favorecer el crecimiento de levaduras (Osorio et al., 2022).

Con respecto a la calidad sensorial, el estado de madurez EM3 presentó el mayor porcentaje de defectos sensoriales (9,38%), con respecto a todos los tratamientos evaluados.

El tratamiento EM3T20t20 presentó defecto sensorial fermento en siete de las ocho unidades experimentales analizadas (87,5%), este fue el tratamiento con mayor efecto negativo en la calidad. Tratamientos con las mismas temperaturas de proceso y tiempos de prolongación del proceso de fermentación, en los estados de madurez EM1 y EM2 no presentaron defectos con la misma frecuencia de defectos que el tratamiento asociado al EM3. Do Carmo et al. (2020) evaluaron 6, 12, 18, 24, 30 y 36 horas de fermentación, los valores más bajos de puntaje sensorial se encontraron en la fermentación por 30 y 36 horas, reportando una astringencia verde asociada a cambios de las membranas celulares de los granos, lo que les permitió definir que el exceso de fermentación perjudica la calidad de la bebida y la calidad fisiológica.

Entre los compuestos volátiles y el puntaje total SCA, se realizó una matriz de coeficientes de correlación de Pearson; este coeficiente determina la dependencia lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas; si el valor se calcula con signo positivo, existe una correlación positiva y lo contrario para una correlación negativa. Los CV hexanal y el ácido 3-metilbutanoico presentaron una correlación negativa con el puntaje total SCA de -0,5 y -0,38 lo que podría sugerir que valores superiores se asocian con una disminución de la calidad sensorial de la bebida, pero entre estos dos compuestos se evidenció una relación positiva (0,6) (**Figura 8**). El hexanal ha sido identificado como un compuesto volátil clave que contribuye a descriptores de sabor vegetales y herbáceos en diferentes alimentos. Este aldehído, producto de la oxidación de lípidos y la degradación de ácidos grasos insaturados, no solo confiere aromas herbáceos, sino que también genera sabores desagradables y disminución del perfil sensorial en productos como las almendras, indicando deterioro en la calidad (Chambers IV & Koppel, 2013). Por otro lado, el ácido 3-metilbutanoico, también denominado ácido isoalérico, se caracteriza por presentar un olor descrito comúnmente como similar a queso acre o sudor (Galarza & Figueroa, 2022). Este compuesto ha sido identificado como un contribuyente significativo a defectos sensoriales en productos fermentados, particularmente en vinos afectados por la levadura del género *Brettanomyces* (Zhang et al., 2010).

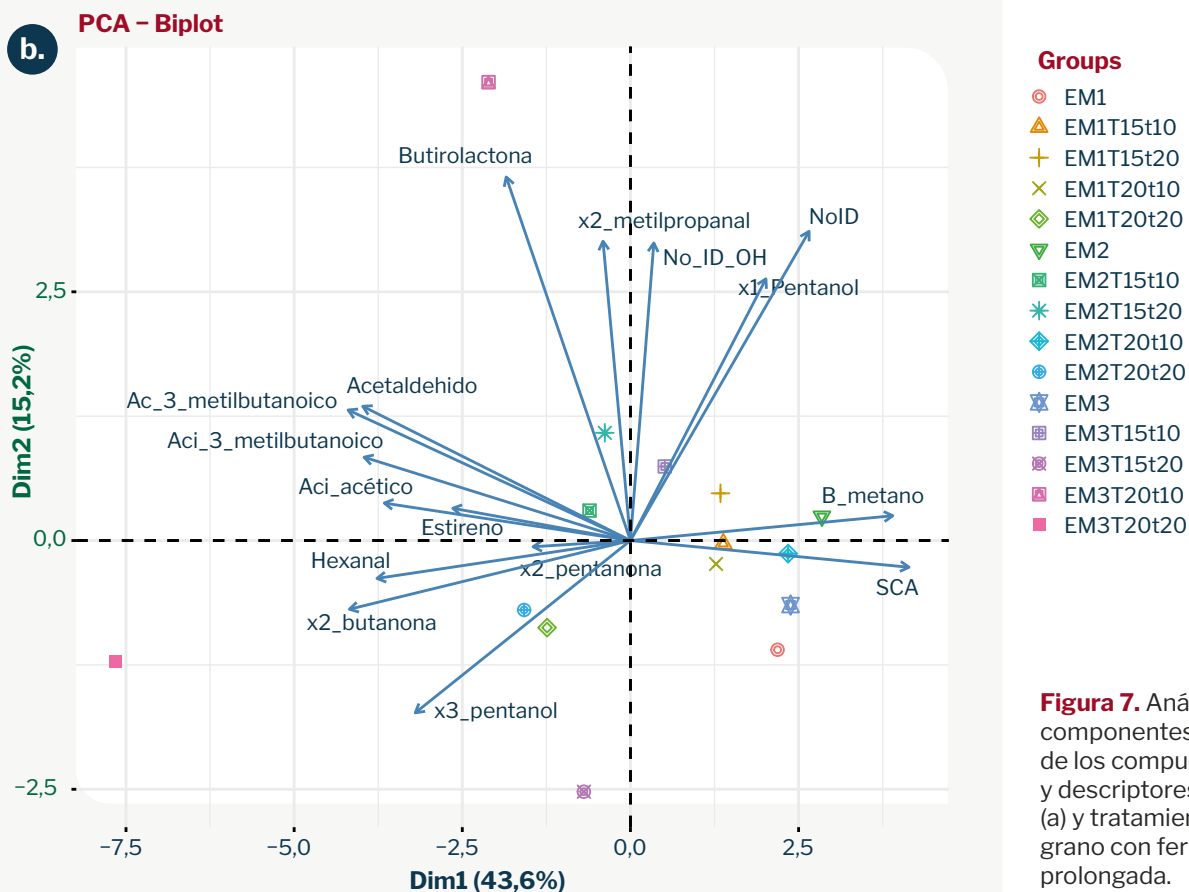
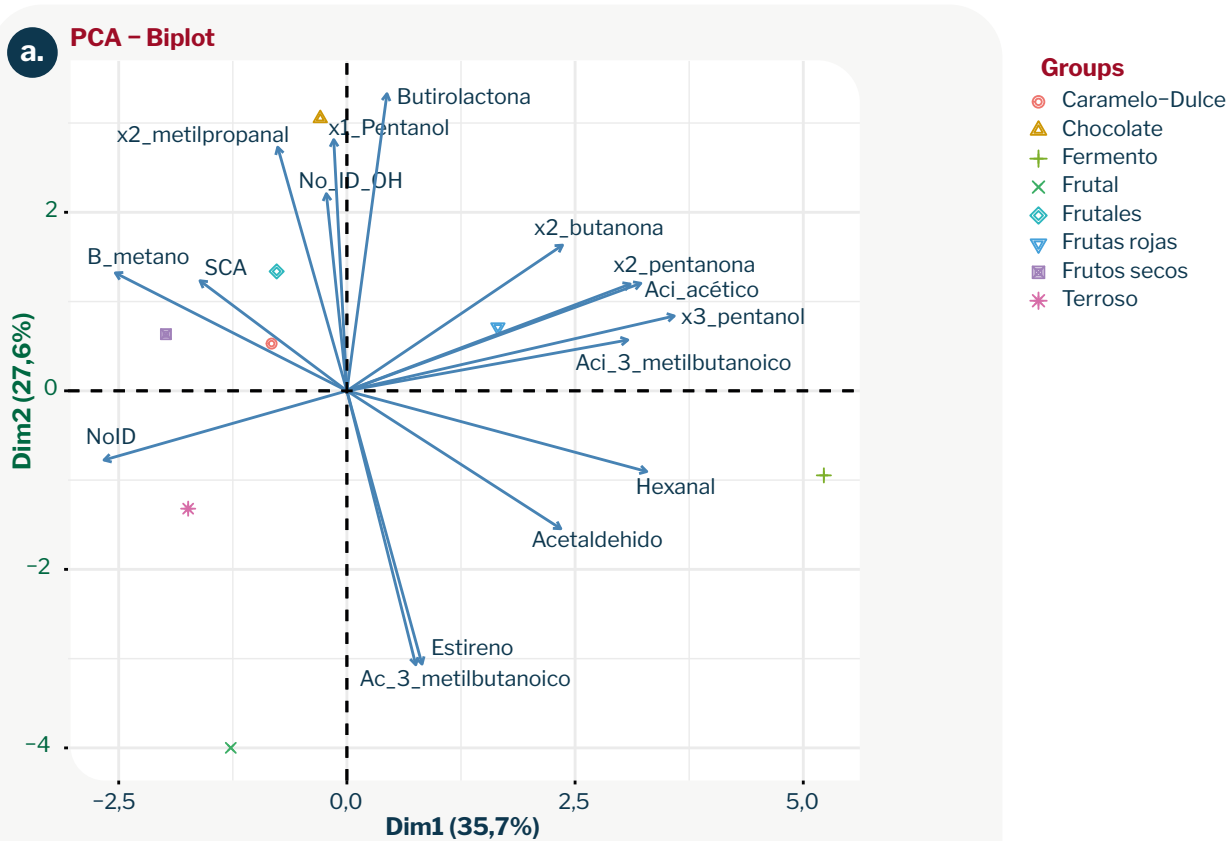


Figura 7. Análisis de componentes principales de los compuestos volátiles y descriptores sensoriales (a) y tratamientos (b) en el grano con fermentación prolongada.

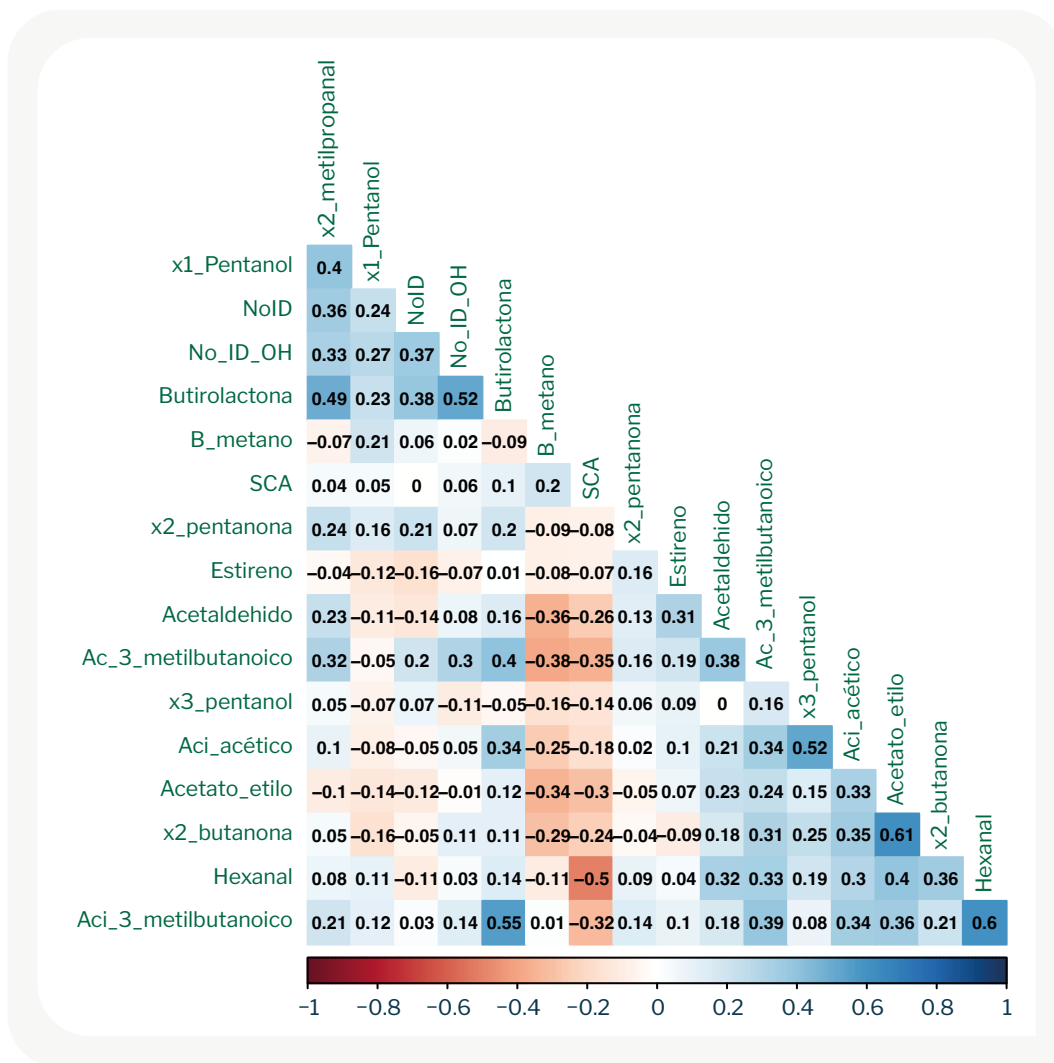


Figura 8. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson clúster 2 - Fermentación prolongada del mucílago.

Conclusión

Los compuestos volátiles desempeñan un papel fundamental en la definición del perfil sensorial del café; son responsables de las características aromáticas que complementan los atributos generados por los compuestos no volátiles del grano, aportando significativamente a su calidad y aceptación por parte del consumidor. Estos compuestos, entre los que se incluyen aldehídos, ésteres, alcoholes, cetonas y ácidos, se generan principalmente durante el procesamiento poscosecha; estos metabolitos, si bien minoritarios frente a los formados durante el proceso de tueste, son cruciales para definir y diferenciar el perfil de sabor y aroma del café verde que ha sido sometido a diversos tipos de procesos y su presencia y concentración tienen impacto tanto positivo como negativo en la percepción sensorial; mientras algunos volátiles contribuyen con notas agradables y deseables como frutales, florales o achocolatadas, otros pueden inducir defectos asociados a aromas herbáceos, rancios o químicos.

Esta investigación determinó el perfil volátil de muestras de café, definiendo un total de 48 compuestos presentes en granos de café obtenidos de frutos en distintos estados de madurez, sometidos a reserva del fruto y a fermentación prolongada del mucílago. Se observó que la reserva del fruto, particularmente a 48 horas, promovió el desarrollo de compuestos como el acetato de etilo, el ácido acético y el etanol, los cuales favorecieron la expresión de notas frutales y de frutos rojos. En contraste, la fermentación prolongada del mucílago, especialmente en frutos con madurez avanzada y en condiciones de mayor temperatura, redujo los puntajes de atributos sensoriales clave, generando defectos como el fermento. Este fenómeno se asoció a un aumento de compuestos como el hexanal y el ácido 3-metilbutanoico, relacionados con percepciones sensoriales no deseadas. Por lo tanto, el control de las variables de procesamiento, almacenamiento y preparación es esencial para maximizar la expresión positiva de los compuestos volátiles y evitar la formación de defectos, asegurando así un perfil sensorial balanceado y una calidad final elevada del café.

Agradecimientos

De la disciplina de Calidad a Jenny Paola Pabón, Luz Fanny Echeverri, Claudia Patricia Gallego, Paola Calderón, Wilson Vargas y Víctor Castañeda. Al equipo de Experimentación: Carlos Gonzalo Mejía, José Farid López y John Félix Trejos.

Contribución de los autores

Conceptualización, análisis formal, investigación, gestión de datos, redacción y elaboración del borrador original: VO; Análisis formal, revisión y edición: AO, LCI, MRFA. Todos los autores han leído y aceptado la versión del manuscrito.

Financiación

Los autores declaran que recibieron apoyo financiero para la investigación y/o publicación de este artículo. Esta investigación fue financiada por el Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé (Crossref Funder ID 100019597), proyecto CAL102002.

Declaración de disponibilidad de datos

Los datos de investigación no están disponibles debido a que están sujetos a restricciones institucionales. Las solicitudes de acceso pueden dirigirse al autor de correspondencia y serán consideradas previa aprobación.

Declaración de conflictos de interés

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un posible conflicto de intereses.

Declaración de uso de IA

Durante el proceso de redacción se empleó tecnología asistida por inteligencia artificial con el fin de mejorar la legibilidad y la calidad del lenguaje del manuscrito.

Material suplementario

El presente artículo no incluye material suplementario.

Literatura citada

Aswathi, K. N., Shirke, A., Praveen, A., & Murthy, P. S. (2024). Functioning of *Saccharomyces cerevisiae* in honey coffee (*Coffea canephora*) and their effect on

metabolites, volatiles and flavor profiles. *Food Research International*, 180, 114092. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114092>

Avallone, S., Guiraud, J.-P., Guyot, B., Olguin, E., & Brillouet, J.-M. (2001). Fate of Mucilage Cell Wall Polysaccharides during Coffee Fermentation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(11), 5556–5559. <https://doi.org/10.1021/jf010510s>

Batista Da Mota, M. C., Batista, N. N., Rabelo, M. H. S., Ribeiro, D. E., Borém, F. M., & Schwan, R. F. (2020). Influence of fermentation conditions on the sensorial quality of coffee inoculated with yeast. *Food Research International*, 136, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109482>

Burdock, G. A. (2016). *Fenaroli's Handbook of Flavor Ingredients* (6a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439847503>

Caporaso, N., Whitworth, M. B., Cui, C., & Fisk, I. D. (2018). Variability of single bean coffee volatile compounds of Arabica and robusta roasted coffees analysed by SPME-GC-MS. *Food Research International*, 108, 628–640. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.077>

Cascos, G., Lozano, J., Montero-Fernández, I., Marcía-Fuentes, J. A., Aleman, R. S., Ruiz-Canales, A., & Martín-Vertedor, D. (2023). Electronic Nose and Gas Chromatograph Devices for the Evaluation of the Sensory Quality of Green Coffee Beans. *Foods*, 13(1), 87. <https://doi.org/10.3390/foods13010087>

Caixeta, I. F., Guimarães, R. M., & Malta, M. R. (2013). Qualidade da semente de café pelo retardamento do processamento pós-colheita. *Coffee Science*, 8(3), 249–255. <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/425>

Chambers, E., & Koppel, K. (2013). Associations of Volatile Compounds with Sensory Aroma and Flavor: The Complex Nature of Flavor. *Molecules*, 18(5), 4887–4905. <https://doi.org/10.3390/molecules18054887>

Clarke, R. J., & Vitzthum, O. G. (Eds.). (2001). *Coffee: Recent developments*. Wiley-Blackwell. <http://doi.org/10.1002/9780470690499>

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), e02398-16. <https://doi.org/10.1128/AEM.02398-16>

Dippong, T., Dan, M., Kovacs, M. H., Kovacs, E. D., Levei, E. A., & Cadar, O. (2022). Analysis of Volatile Compounds, Composition, and Thermal Behavior of Coffee Beans

- According to Variety and Roasting Intensity. *Foods*, 11(19), 3146. <https://doi.org/10.3390/foods11193146>
- Do Carmo, K. B., Carmo, J. C. B. D., Krause, M. R., & Peterle, G. (2020). Sensory and physiological quality of arabic coffee under different fermentation times. *Bioscience Journal*, 36(2), 429–438. <https://doi.org/10.14393/BJ-v36n2a2020-43255>
- Evangelista, S. R., Silva, C. F., Miguel, M. G. P. D. C., Cordeiro, C. D. S., Pinheiro, A. C. M., Duarte, W. F., & Schwan, R. F. (2014). Improvement of coffee beverage quality by using selected yeasts strains during the fermentation in dry process. *Food Research International*, 61, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.11.033>
- Galarza, G., & Figueroa, J. G. (2022). Volatile Compound Characterization of Coffee (*Coffea arabica*) Processed at Different Fermentation Times Using SPME–GC–MS. *Molecules*, 27(6), 2004. <https://doi.org/10.3390/molecules27062004>
- Joët Thierry, Laffargue Andréina, Descroix Frédéric, Doubeau Sylvie, Bertrand Benoît, De Kochko Alexandre, Dussert Stéphane. (2010). Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food Chemistry*, 118 (3) : pp. 693-701. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.048>
- Kulapichitr, F., Borompichaichartkul, C., Pratontep, S., Lopetcharat, K., Boonbumrung, S., & Suppavorasatit, I. (2017). Differences in volatile compounds and antioxidant activity of ripe and unripe green coffee beans (*Coffea arabica* L. 'Catimor'). *Acta Horticulturae*, (1179), 261–268. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2017.1179.41>
- Marie, L., Breitler, J.-C., Bamogo, P. K. A., Bordeaux, M., Lacombe, S., Rios, M., Lebrun, M., Boulanger, R., Lefort, E., Nakamura, S., Motoyoshi, Y., Mieulet, D., Campa, C., Legendre, L., & Bertrand, B. (2024). Combined sensory, volatilome and transcriptome analyses identify a limonene terpene synthase as a major contributor to the characteristic aroma of a *Coffea arabica* L. specialty coffee. *BMC Plant Biology*, 24(1), 238. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04890-3>
- Marwani, E., Syamsudin, T. S., Awaliyah, S., Maulani, R. R., Hidayat, A., Husyari, U. D., & Widiyanto, S. (2024). Volatile Metabolite Profiles of Robusta Green Bean Coffee From Different Geographical Origins in West Java and Their Correlation With Temperature, Rainfall, and Altitudes Using SPME GC-MS–Based Metabolomics. *International Journal of Food Science*, 2024(1), 6908059. <https://doi.org/10.1155/2024/6908059>
- Osorio, V., Álvarez-Barreto, C. I., Matallana, L. G., Acuña, J. R., Echeverri, L. F., & Imbachí, L. C. (2022). Effect of Prolonged Fermentations of Coffee Mucilage with Different Stages of Maturity on the Quality and Chemical Composition of the Bean. *Fermentation*, 8(10), 519. <https://doi.org/10.3390/fermentation8100519>
- Osorio, V., Matallana, L. G., Fernandez, M. R., Alvarez, C. I., Gallego, C. P., & Montoya, E. C. (2023). Chemical Composition and Sensory Quality of Coffee Fruits at Different Stages of Maturity. *Agronomy*, 13(2), 341. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020341>
- Peñuela-Martínez, A. E., Pabón, J., & Sanz-Urbe, J. R. (2013). Método fermaestro: Para determinar la finalización de la fermentación del mucilago de café. *Avances Técnicos Cenicafé*, 431, 1–8. <https://doi.org/10.38141/10779/0431>
- Peñuela-Martínez, A. E., Zapata-Zapata, A. D., & Durango-Restrepo, D. L. (2018). Performance of different fermentation methods and the effect on quality coffee (*Coffea arabica* L.). *Coffee Science*, 13(4), 465. <https://doi.org/10.25186/cs.v13i4.1486>
- Sarghini, F., Fasano, E., De Vivo, A., & Tricarico, M. C. (2019). Influence of Roasting Process in Six Coffee Arabica Cultivars: Analysis of Volatile Components Profiles. *Chemical Engineering Transactions*, 75, 295–300. <https://doi.org/10.3303/CET1975050>
- Specialty Coffee Association. (2004). *Cupping Protocols. Protocols & Best Practices*. <https://sca.coffee/research/protocols-best-practices>
- Tsegay, G., Redi-Abshiro, M., S. Chandravanshi, B., Ele, E., M. Mohammed, A., & Mamo, H. (2019). Volatile profile of green coffee beans from *Coffea arabica* L. plants grown at different altitudes in Ethiopia. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 33(3), 401–413. <https://doi.org/10.4314/bcse.v33i3.2>
- Várady, M., Tauchen, J., Fraňková, A., Klouček, P., & Popelka, P. (2022). Effect of method of processing specialty coffee beans (natural, washed, honey, fermentation, maceration) on bioactive and volatile compounds. *LWT*, 172, 114245. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114245>
- Velmourougane, K., Bhat, R., Gopinandhan, T. N., & Panneerselvam, P. (2011). Impact of delay in processing on mold development, ochratoxin-A and cup quality in arabica and robusta coffee. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 27(8), 1809–1816. <https://doi.org/10.1007/s11274-010-0639-5>
- Vezzulli, F., Lambri, M., & Bertuzzi, T. (2023). Volatile Compounds in Green and Roasted Arabica Specialty Coffee: Discrimination of Origins, Post-Harvesting Processes, and Roasting Level. *Foods*, 12(3), 489. <https://doi.org/10.3390/foods12030489>
- Wie, L., Tay, G. Y., Cheong, M. W., Curran, P., Yu, B., & Liu, S. Q. (2017). Modulation of the volatile and non-volatile

profiles of coffee fermented with *Yarrowia lipolytica*: II. Roasted coffee. *LWT*, 80, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.01.070>

Wu, H., Gonzalez Viejo, C., Fuentes, S., Dunshea, F. R., & Suleria, H. A. R. (2024). Evaluation of spontaneous fermentation impact on the physicochemical properties and sensory profile of green and roasted arabica coffee by digital technologies. *Food Research International*, 176, 113800. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113800>

Yang, N., Liu, C., Liu, X., Degn, T. K., Munchow, M., & Fisk, I. (2016). Determination of volatile marker compounds of common coffee roast defects. *Food Chemistry*, 211, 206–214. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.04.124>

Yusianto, & Nugroho, D. (2014). Physical and Flavor Profiles of Arabica Coffee as Affected by Cherry Storage Before Pulping. *Pelita Perkebunan*, 30(2), 137–158. <https://doi.org/10.22302/iccricri.jur.pelitaperkebunan.v30i2.7>

Zhang, K., Cheng, J., Hong, Q., Dong, W., Chen, X., Wu, G., & Zhang, Z. (2022). Identification of changes in the volatile compounds of robusta coffee beans during drying

based on HS-SPME/GC-MS and E-nose analyses with the aid of chemometrics. *LWT*, 161, 113317. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113317>

Zhang, Y., Li, X., Lo, C.-K., & Guo, S.-T. (2010). Characterization of the Volatile Substances and Aroma Components from Traditional Soypaste. *Molecules*, 15(5), 3421–3427. <https://doi.org/10.3390/molecules15053421>

Nota del editor

Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en los textos publicados en la Revista Cenicafé son responsabilidad exclusiva de sus autores y no reflejan necesariamente la posición del editor, del responsable de la publicación ni del equipo editorial, quienes no asumen responsabilidad por eventuales daños a personas o bienes derivados del uso de las ideas, métodos, instrucciones o productos mencionados.

La referencia a productos químicos específicos, maquinaria o equipos comerciales en los textos publicados no implica, en ningún caso, su respaldo o aprobación por parte del editor.