Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Facultad de Ingeniería Química
Facultad de Ciencias Químicas
Maestría en Ciencia y Tecnología de Alimentos

ANÁLISIS DE LA MODIFICACIÓN DE CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS Y FISICOQUÍMICAS DE CAFÉ CEREZA TRATADO POR ALTA PRESIÓN HIDROSTÁTICA Y SU EFECTO SOBRE ATRIBUTOS SENSORIALES DE EXTRACTOS DE CAFÉ

TESIS PRESENTADA PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRIA EN CIENCIA DE ALIMENTOS

PRESENTA:
MADAI GIZEH SÁNCHEZ ARZUBIDE

DIRECTOR DE TESIS
DR. HÉCTOR RUIZ ESPINOSA

CO-DIRECTOR DE TESIS
DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

H. PUEBLA DE Z., FEBRERO 2026

Agradecimientos

Índice

Índice ... iii
Índice de tablas ... v
Índice de figuras ... vi
RESUMEN ... 1
I. Introducción ... 3
Objetivo general ... 6
Objetivos específicos ... 6
II. Antecedentes ... 7
2.1. Generalidades del café ... 7
2.1.1 Taxonomía ... 7
2.1.2 Morfología ... 8
2.1.3 Fenología ... 8
2.1.4 Beneficiado de café ... 10
2.2 Características sensoriales del café ... 14
2.2.1 Precursores de aroma y sabor ... 14
2.2.2 Métodos analíticos de detección de precursores y aromáticos de café ... 17
2.2.3 Atributos sensoriales del café de especialidad ... 18
2.2.5 Métodos sensoriales aplicados a café. ... 23
2.3 Microbiota del café y procesos fermentativos ... 25
2.3.1 Microbiota nativa del café ... 25
2.3.2 Fermentación controlada ... 28
2.4 Alta presión hidrostática ... 35
2.4.1 Definición y principios de acción. ... 35
2.4.3 Efectos del PAPH sobre microbiota de alimentos ... 36
2.4.4 Efectos de modulación de PAPH ... 37
2.4.4.1 Efecto sobre pH y acidez titulable ... 39
2.4.4.2 Efecto sobre color ... 39
2.4.4.3 Efecto sobre textura ... 40
2.4.4.4 Efecto sobre sabor ... 41
2.4.4.5 Efecto sobre proteínas ... 41
2.4.4.6 Efecto sobre enzimas ... 42
III. Metodología ... 44
3.1 Selección de materia prima. ... 45

3.2 Tratamiento por alta presión hidrostática. *45*
3.3 Caracterización fisicoquímica. 46
3.3.1 Colorimetría triestímulo. *46*
3.3.2 Contenido de humedad y actividad de agua *47*
3.3.3 °Brix. *47*
3.3.4 pH y acidez. *47*
3.4 Proceso de beneficiado *48*
3.4.1 Fermentación/secado de cerezas. *48*
3.4.2 Limpieza, trillado y tostado. *48*
3.5 Caracterización sensorial del café. *49*
3.5.1 Calibración de jueces expertos. *49*
3.5.3 Temporal Dominance of Sensations (TDS). *51*
3.6 Secuenciación masiva y recuento microbiano para caracterización de microbiota de café *52*
3.7 Determinación de ácido clorogénico, trigonelina y cafeína por HPLC. *53*
3.7.1 Curvas de calibración. *53*
3.7.2 Preparación de muestra. *53*
3.8 Identificación de compuestos aromáticos con cromatografía de gases acoplada a masas. *54*
IV. Discusión de resultados. *57*
4.1 Materia prima *57*
4.2 Análisis fisicoquímicas en café cereza *57*
4.3 Recuento microbiano *63*
4.4 Cambios post beneficiado en café verde *66*
4.5 Tostado *68*
4.6 Caracterización sensorial del café *72*
4.6.1. Calibración del panel. *72*
4.6.2 Perfil descriptivo *73*
4.6.3 Temporal Dominance of Sensations (TDS) *76*
4.7 Identificación de compuestos aromáticos de café con cromatografía de gases acoplada a masas (GC-MS). 79
4.8 Detección de trigonelina, cafeína y ácido clorogénico por HPLC *82*
4.9 Identificación de cambios aromáticos con equipo CVC. *84*
V. Conclusiones 86
VII. Referencias 87

Índice de tablas

Tabla 1. Principales compuestos aromáticos en café. 17
Tabla 2. Especies microbianas identificadas durante la fermentación natural de café. 27
Tabla 3. Reducciones logarítmicas en diferentes alimentos tratados por PAPH 38
Tabla 4. Parámetros primarios de color en cerezas tratadas con alta presión hidrostática. 58
Tabla 5. Parámetros derivados de color triestímulo en cerezas de café tratadas con alta presión hidrostática. 61
Tabla 6. Parámetros fisicoquímicos en café cereza atribuidos al tratamiento por alta presión hidrostática. 63
Tabla 7. Recuento de microorganismos indicadores en café cereza con y sin tratamiento de PAPH 66
Tabla 8. Porcentaje de humedad y actividad de agua en café verde 67
Tabla 9. Luminosidad, chroma y hue en café verde pretratado por PAPH. 68
Tabla 10. Pérdida de peso en café pretratado por PAPH sometido a tostado medio. 69
Tabla 11. Parámetros de color instrumental para el café tostado de frutos tratados por PAPH vs control. 71
Tabla 12. Valores de actividad de agua y porcentaje de humedad en café tostado. 72
Tabla 13. Ejemplo del formato de términos de asociación de un juez con los descriptores de referencia. 73
Tabla 14. Promedios de los descriptores identificados en cada bebida de café con y sin tratamiento de PAPH 74
Tabla 15. pH, °Brix y acidez titulable de bebida de café pretratada de PAPH 79
Tabla 16. Número de compuestos volátiles por familia quimica aromática. 80
Tabla 17. Concentración de cafeína, trigonelina y ácido clorogénico en extractos de café tratado por PAPH 83

Índice de figuras

Figura 1. Partes de la cereza de café..... 9
Figura 2. Procesos de beneficiado del café cereza 11
Figura 3. Rueda de sabores para catación de café 20
Figura 4. Formato de catación de la SCA.....21
Figura 5. Proceso de fermentación carbónica 32
Figura 6. Efectos del PAPH sobre la desnaturalización de proteínas 42
Figura 7. Diagrama de tratamiento de café cereza por alta presión, su beneficiado y análisis. .44
Figura 8. Recolección y pretratamiento de café cereza.....45
Figura 9. Tratamiento de alta presión hidrostática en cerezas 46
Figura 10. Determinación de pH en muestras de café cereza. 47
Figura 11. Proceso de beneficiado natural de la cereza de café 48
Figura 12. Selección de café para trillado y tostado 49
Figura 13. Proceso de entrenamiento de panel.....50
Figura 14. Prueba de perfil descriptivo diseñada con FIZZ® para aromáticos de café 50
Figura 15. Evaluación de la bebida de café con y sin tratamiento de PAPH.....51
Figura 16. Software ®para realizar la prueba de TDS 52
Figura 17. Prototipo de nariz electrónica basada en sensores responsivos 55
Figura 18. Conteo de BAL, CT , BMA, H y L en muestras de café natural tratadas con PAPH vs Control 66
Figura 22. Prueba TDS de muestras de bebida de café PAPH 77
Figura 23. Análisis de componentes principales para los compuestos volátiles de café con y sin tratamiento de PAPH 81
Figura 24. Curvas de calibración para cafeína trigonelina y ácido clorogénico.....82
Figura 25. Relación entre los compuestos volátiles generados a partir de precursores químicos en café verde identificados con la cámara CVC 85

RESUMEN

El incremento en el consumo y la producción de café de especialidad se ha visto impulsado por las características sensoriales superiores que ofrece respecto al café comercial. En respuesta, diversos productores han reorientado sus prácticas mediante estrategias como la introducción de variedades no tradicionales, la optimización de técnicas de cultivo, la adopción de nuevos métodos de beneficiado, la aplicación de cultivos iniciadores, el uso de sistemas de fermentación controlada y el desarrollo de procesos basados en tecnologías emergentes. Estas alternativas buscan generar perfiles de calidad diferenciada, con mayor valor agregado y atractivo comercial.

En este contexto, el presente estudio evaluó el efecto del procesamiento de alta presión hidrostática (PAPH) aplicado como pretratamiento del café cereza (*Coffea arabica*) a 200 y 400 MPa durante 0, 3, 5 y 10 min a 25°C. El objetivo fue determinar su impacto sobre las características microbiológicas, fisicoquímicas y sensoriales del fruto y de sus extractos líquidos. La caracterización incluyó: (i) análisis de la microbiota nativa y características fisicoquímicas del fruto tras los tratamientos; (ii) cuantificación de precursores solubles de sabor; (iii) identificación de compuestos aromáticos mediante microextracción en fase sólida acoplada a cromatografía de gases–espectrometría de masas (SPME–GC–MS); (iv) evaluación sensorial mediante la metodología *Temporal Dominance of Sensations* (TDS); y (v) análisis preliminar de compuestos volátiles en granos tostados mediante un sistema de sensores (CVC) novedoso.

En cuanto al efecto sobre microorganismos indicadores, el PAPH produjo la eliminación completa de coliformes totales en todos los tratamientos, así como reducciones significativas de bacterias mesófilas aerobias y bacterias ácido-lácticas a 400 MPa, mientras que, en hongos y levaduras, las reducciones significativas ocurrieron a 200 MPa (3–10 min) y 400 MPa (5 min), lo que indica una modulación efectiva de la microbiota nativa del café. Con relación a las propiedades fisicoquímicas, se observó un incremento significativo del pH y una disminución de la acidez en los tratamientos a 200 y 400 MPa (3 y 10 min). Los valores de °Brix disminuyeron en todos los casos, lo que se atribuye a la ruptura celular y liberación de azúcares solubles, sugiriendo un aumento en la fracción de azúcares reductores por hidrólisis de sacarosa.

Los tratamientos a 400 MPa (3, 5 y 10 min) promovieron incrementos significativos en la concentración de ácido clorogénico (CQA), trigonelina y cafeína como precursores de sabor, lo cual indica una mayor liberación y disponibilidad de metabolitos bioactivos inducida por presión. Los análisis SPME–GC–MS evidenciaron mejoras en atributos aromáticos deseables y la reducción de notas indeseables (metálico, astringente, tierra, paja), posiblemente debido a

alteraciones en la matriz celular y a la modulación de población microbiana. El análisis TDS permitió la diferenciación de tres grupos sensoriales: control (grupo 1), tratamientos de 400 MPa y 200 MPa/3 min (grupo 2), y tratamientos de 200 MPa/5–10 min (grupo 3). El grupo 2 presentó la mayor diversidad de descriptores, lo que sugiere un perfil sensorial más complejo. Finalmente, el sistema CVC mostró sensibilidad suficiente para discriminar cambios en compuestos volátiles entre tratamientos, aunque se requiere una identificación más específica de los compuestos responsables.

En conjunto, los resultados posicionan al PAPH como una tecnología emergente eficaz para modular la microbiota del café cereza, mejorar la disponibilidad de precursores de sabor y generar perfiles sensoriales diferenciados bajo condiciones específicas de presión y tiempo. Estos hallazgos refuerzan el potencial del PAPH como herramienta para el desarrollo de productos de café de especialidad con atributos de mayor valor agregado.

I. Introducción

El café (*Coffea* sp.) es un producto agroalimentario de considerable relevancia comercial, que tiene una fuerte influencia sobre indicadores económicos en diversos países, tanto subdesarrollados como desarrollados, y es una de las bebidas no alcohólicas más apreciadas a nivel global. Es originario de Etiopía donde crecía de forma silvestre; posteriormente fue introducido a Arabia Central hacia el siglo XV como un cultivo doméstico para obtener una bebida a partir de las cerezas; simultáneamente, en Yemen el grano de la cereza comenzó a tostarse y molerse, difundiéndose su consumo en el mundo islámico. En 1570 fue introducido a Europa donde se popularizó; a México llegó en 1795, donde empezó a cultivarse en Córdoba, Veracruz.

A nivel mundial se producen 7.7 millones Ton/año de café, representando una superficie total de cultivo de 10.5 millones has en 50 países. La producción mundial se concentra predominantemente en cinco de ellos: Brasil (2.2 millones Ton), Vietnam (1.2 millones Ton), Colombia (0.54 millones Ton), Indonesia (0.41 millones Ton) y Etiopía (0.27 millones Ton); por su parte, México ocupa el undécimo lugar mundial con una producción esperada de 230, 400 Ton en el bienio 2022-2023 y la producción nacional de café representa 0.66 % y 1.34 % del Producto Interno Bruto y de la Producción de Bienes Agroindustriales, respectivamente.

El café se clasifica de acuerdo con distintos criterios, tales como especie, tipo de beneficiado y calidad asignada. Aunque existen innumerables especies de café las dos con mayor relevancia comercial global son Arábica (*Coffea arabica*) y Robusta (*Coffea canephora*). La primera, que es la especie más cultivada en el mundo y la de mayor valor comercial, crece a una altitud de 800 a 2100 metros sobre el nivel del mar (msnm), posee un grano de forma alargada, contiene de 1.2 a 1.5 % de cafeína y se destina a la elaboración de cafés de calidad superior, incluyendo aquellos considerados de especialidad. Por el contrario, el café Robusta, de menor magnitud de producción crece a menor altitud (200 – 800 msnm), su grano es de forma redondeada, contiene mayor proporción de cafeína (2.2 a 2.7 %) y se destina mayoritariamente a la elaboración de café soluble. Dentro de la especie arábica existen diversas variedades que se han posicionado de manera exitosa en el mercado internacional por su potencial para desarrollar productos con características sensoriales distintivas, incluyendo Typica, Geisha, Marsellesa, Costa Rica 95, Caturra, Bourbon, entre otras. En cuanto a la clasificación por método de beneficiado el café puede ser natural (donde la cereza se recolecta y se seca al sol sin ser despulpada), lavado (donde la cereza se recolecta, lava, despulpa, fermenta por 24 h y se seca al sol) o *honey* (donde la cereza se despulpa, dejando un remanente de mucílago y se seca al sol); se considera que cada método permite desarrollar características sensoriales específicas

en el producto en taza. Finalmente, en cuanto al nivel de calidad existen distintas denominaciones, generalmente no estandarizadas, lo que dificulta su valoración; de acuerdo con su calidad percibida se han definido términos como comercial, de altura, *gourmet*, orgánico*, premium*, y de especialidad. Aunque las características que debe poseer un café para incluirse dentro de una de estas categorías dependen de la fuente consultada, ésta última sí está regida por criterios específicos; de acuerdo con la Asociación de Cafés de Especialidad (SCA), el grano debe estar libre de defectos primarios previo al tostado, poseer el tamaño y grado de secado adecuados, no presentar defectos en taza y exhibir atributos distintivos.

Aunque de forma incipiente, el café de especialidad está ganando terreno en México; esto puede observarse en la producción emergente de café en *microlotes* en distintos estados del país, posicionándose de forma gradual en barras de café de especialidad con productos de alta trazabilidad, donde el consumidor puede identificar la variedad de café, el grado de tostado y el tipo de fermentación empleado para su elaboración, así como seleccionar un método de extracción específico. Este fenómeno tiene implicaciones interesantes en materia económica debido a que se observa un valor agregado a la cadena productiva dando la oportunidad de no solo consumir el café al interior del país, sino que también se destina para exportación abriendo un mercado específico para un producto diferenciado. Por tanto, diversos productores han decidido reconvertir sus procesos hacia el mercado de especialidad a través de estrategias diversas como la exploración de variedades no tradicionales en regiones específicas, el empleo de técnicas mejoradas de producción, la implementación de nuevos métodos de beneficiado, el uso de sistemas controlados de fermentación o el empleo de atmósferas modificadas y el desarrollo de nuevos procesos empleando tecnologías no convencionales para buscar obtener productos de calidad diferenciada, de alto valor agregado y con mayor potencial de mercado.

Para ser competitivos, es esencial que los productores de café oferten una materia prima de calidad consistente y estandarizada a lo largo de toda la cadena productiva para obtener un producto con características sensoriales distintivas y apropiadas para el mercado meta designado (CEDRSSA, 2020). En este sentido, los cafés de alta gama, como el de especialidad; se han popularizado recientemente entre consumidores de poder adquisitivo A/B (AMAI, 2023) que buscan experiencias sensoriales novedosas, valoran aromas y sabores únicos en este producto y están dispuestos a pagar un sobrecosto por ello. Así, un número importante de productores de café, visualizando esta oportunidad de mercado, han empezado a reconvertir su esquema de producción, optando por variedades no nativas de alta gama y por nuevos procesos de fabricación que resalten sus características sensoriales y refuercen su potencial de comercialización.

Se ha observado que los atributos sensoriales del café están influenciados por rasgos genéticos, factores geográficos, prácticas agrícolas y técnicas postcosecha, incluyendo diversos procesos de fermentación (Borrella et al*.,* 2015). Investigaciones recientes indican que los procesos de fermentación de café se están popularizando, en particular aquellos diseñados para producir café de especialidad. De acuerdo con Vaast et al. (2005), durante la fermentación se producen varios cambios fisiológicos en los granos incluyendo disminuciones en el contenido de agua y azúcares simples y el desarrollo de precursores de aroma y sabor que resultan críticos para el desarrollo de perfiles sensoriales en taza. Entre los principales tipos de microorganismos responsables de la fermentación resaltan diversos géneros de bacterias ácido-lácticas (Lactobcillus, Leuconostoc y Lactococus), así como algunas levaduras *(Pichia* sp*, Candida* sp*, Saccharomyces* sp. y *Hanseniaspora* sp) quienes desempeñan un papel importante en la degradación del mucílago al producir tanto enzimas, como metabolitos (alcoholes y ácidos). Adicionalmente, los cafeticultores han empezado a implementar procesos fermentativos más controlados, que no dependan de la microbiota nativa del fruto, si no que empleen microorganismos iniciadores inoculados, práctica común en otras áreas agroindustriales, pero aún incipiente en la producción de café (De Oliveira Junqueira et al., 2019; De Melo Pereira et al., 2020; Martins et al., 2020; Pothakos et al., 2020).

Los diferentes métodos de procesamiento y las condiciones ambientales pueden modificar el comportamiento microbiano, la presencia y concentración de precursores de compuestos volátiles y la producción de ácidos orgánicos de granos de café, propiciando alteraciones en el proceso fermentativo y, en consecuencia, modificaciones en los perfiles de volátiles y aromas del café tostado y, por tanto, de los extractos de café (Evangelista et al., 2014; Lee et al., 2015; Martínez et al., 2022; Bressani et al., 2021).

Recientemente, se ha propuesto el uso de diferentes tecnologías emergentes no térmicas para conservar alimentos a través de procesos de inactivación microbiana y/o enzimática incluyendo procesos de ultrasonido de alta intensidad, campos eléctricos pulsados, irradiación, pulsos de luz blanca, plasma frío, luz ultravioleta de onda corta, entre otras, destacando el procesamiento a alta presión hidrostática (PAPH) por el número de aplicaciones industriales vigentes. El PAPH es un tratamiento no térmico que se considera puede evitar pérdidas de nutrientes o compuestos de relevancia sensorial debido al tipo de interacciones químicas que afecta mientras que al mismo tiempo incide sobre la inactivación de carga microbiana afectando particularmente a bacterias Gram negativas, levaduras y hongos, en ese orden (Barbosa et al., 2019). Sin embargo, más allá de sus aplicaciones como herramienta de conservación, se ha propuesto el uso de PAPH como factor para mejorar o modular características fisicoquímicas,

funcionales y tecnológicas de los alimentos, mismas que a su vez pueden tener repercusiones en el perfil nutrimental y/o sensorial de los alimentos presurizados (Denoya et al., 2017; Huang et al., 2010). Se sabe que, dependiendo de las condiciones de proceso, incluyendo presión de operación, temperatura y tiempo de presurización, el PAPH es capaz de modular la microbiota, la actividad enzimática, la funcionalidad tecnológica de polímeros y el perfil de antioxidantes de diversos frutos, incluyendo aquellos del café (Huang et al., 2014). Por ello, se considera que el PAPH puede emplearse como una alternativa novedosa de procesamiento que permita hacer más específico el perfil de microbiota presente en el café cereza de variedades preseleccionadas y con ello, en conjunto con una estrategia adecuada de beneficiado, crear productos con características fisicoquímicas y sensoriales distintivas. Considerando lo anteriormente planteado, se llevaron a cabo los siguientes objetivos e hipótesis de trabajo para el proyecto.

Objetivo general

Evaluar el procesamiento de alta presión hidrostática (PAPH) como pretratamiento de café cereza (*Coffea arabica*) y su efecto sobre las características microbiológicas, sensoriales y/o fisicoquímicas de los frutos y de sus extractos.

Objetivos específicos

- Identificar de forma preliminar cambios en el perfil de la microbiota nativa de café cereza (*Coffea arabica*) por aplicación de tratamientos selectos de alta presión hidrostática (PAPH) (0, 200, 400 MPa, 25°C, 3, 5 y 10 min) mediante la técnica de recuento en placa.
- Determinar las características fisicoquímicas (pH, acidez, color, a_w, humedad) de café cereza (*Coffea arabica*) con y sin tratamientos de PAPH.
- Analizar cambios en la concentración de precursores solubles de sabor en extractos de café pretratado por PAPH a través de cromatografía líquida de alta eficiencia.
- Determinar características descriptivas sensoriales de los extractos de café con un panel de evaluadores expertos.
- Realizar un estudio preliminar de identificación de compuestos aromáticos por microextracción en fase sólida analizados por cromatografía de gases acoplada a masas y su comparación con la aplicación de la metodología sensorial de *Temporal Dominance of Sensations* (TDS).
- Evaluar el uso de un sistema novedoso de sensores como herramienta preliminar de identificación de compuestos aromáticos en granos de café tostado tratado por PAPH en comparación con el control.

II. Antecedentes

2.1. Generalidades del café

El término *café* hace referencia a los productos de árboles y arbustos del género *Coffea* La especie de mayor relevancia comercial es *Coffea arabica,* aunque otras especies de gran importancia son *C. canephora* var. robusta (café Robusta), *C. liberica* (café libérica) y *C. liberica* var. dewevrei (café Excelsa) (Febrianto & Zhu, 2023; Hall et al., 2022). La mayoría de las especies de café se originaron en África; *C. arabica* tiene su origen en tierras altas de Etiopía (Abisinia) y el sureste de Sudán, entre 1300 y 2000 msnm, mientras que los orígenes de *C. canephora* están dispersos en áreas tropicales africanas en altitudes por debajo de 1000 msnm (Nair, 2021). Por su parte, *C. liberica* se origina en tierras bajas en África occidental mientras que *C. excelsa* también tiene sus orígenes en África occidental y central (Wintgens, 2004).

Al café se le han dado diversos usos que van desde la masticación de hojas y granos de la planta para aliviar el dolor, el hambre y la fatiga hasta los sofisticados actuales, como el café expreso o descafeinado. Se cree que su consumo como bebida comenzó entre los siglos XV y XVI en Arabia y posteriormente se extendió por el mundo, llegando a Europa a través de Turquía en el siglo XVII (Nair, 2021). Desde el centro de origen en Etiopía, *C. arabica* L. se introdujo en Yemen entre los siglos XV y XVI. Dicha especie se extendió a América del Sur a través de Europa, mientras que *C. canephora* ha tenido una dispersión y expansión más limitada.

2.1.1 Taxonomía

El café pertenece a la familia Rubiaceae, género *Coffea*, el cual está organizado en tres secciones: *Mascarocoffea*, *Eucoffea* y *Paracoffea* (mejor conocido como *Coffea*), las dos primeras son nativas de África, mientras que *Coffea* es endémica de Asia Oriental. La mayoría de las especies conocidas se encuentran dentro de las secciones *Coffea* y *Mascarocoffea*. Nair (2021) menciona que la sección *Coffea* está subdividida en cinco subsecciones (*Nanocoffea, Pachycoffea, Erythrocoffea, Melanocoffea* y *Mozambicoffea*) por factores como el grosor de las hojas, altura de los árboles, distribución geográfica y el color de los frutos. Las especies cultivadas de *C. canephora* y *C. arabica* pertenecen a la subsección *Erythrocoffea*, mientras que *Coffea liberica* pertenece a la subsección *Pachycoffea*. Aunque el género *Coffea* comprende de 103-124 especies, según la amplitud de la clasificación taxonómica, *C.arabica* y *C.canephora* son responsables de casi toda la producción mundial de café, ~70 y ~30 %, respectivamente. Mientras *C. arabica* tiene una constitución cromosómica alotetraploide (2n=4x=44) todas las demás especies, incluyendo a *C. canephora,* son diploides (2n=2x=22) (Hall et al., 2022).

La genética del grano de café se relaciona con sus propiedades químicas y biológicas (Febrianto & Zhu, 2023). Diversos estudios han mostrado que las especies comerciales guardan una relación genética estrecha. Los estudios moleculares han confirmado que *C. arabica* es un híbrido anfidiploide entre *C. eugenoides* y *C. canephora* (Hall et al., 2022).

A la planta de café le toman alrededor de tres años desarrollarse desde la germinación de semillas hasta su primer floración y producción de frutos. Al fruto del árbol de café se le conoce como cereza, y los granos que desarrolla en su interior son la base para la producción del café tostado y productos derivados. Un buen manejo del árbol de café puede prolongar su vida hasta ochenta años o más, sin embargo, desde el punto de vista económico, la vida de un plantío raramente sobrepasa los treinta años (Wintgens, 2004).

2.1.2 Morfología

El fruto del café (también llamado cereza o baya) es una drupa ovalada de ~10 mm de tamaño (Tofalo et al., 2015). Los granos de café tienen una piel exterior (pericarpio) de color verde en frutos inmaduros y en los frutos maduros de acuerdo con el cultivo presentarán tonalidades como rojo-violeta, rojo intenso, amarillo o naranja. El pericarpio recubre el mesocarpio (pulpa blanda, amarillenta, fibrosa y dulce), una capa adhesiva de pectina (capa muy hidratada de mucílago), y el endocarpio, también conocido como pergamino. Por último, el endospermo (piel plateada) recubre cada hemisferio del grano de café. La ***Figura 1*** muestra la estructura de la cereza, la semilla consta de un endospermo córneo que contiene un embrión, el cual está envuelto en dos cáscaras: el pergamino exterior y la piel plateada (o tegumento) situada justo debajo, entre las distintas variedades de café hay diferencias en el tamaño y forma del grano de café (semilla), pero de manera general los granos miden ~10 mm de largo y ~6 mm de ancho (Wintgens, 2004).

2.1.3 Fenología

Coa Urbaez et al., (2015) definen a la fenología como el estudio de los eventos periódicos naturales involucrados en la vida de una planta, que ayudan a comprender su desarrollo, la diferenciación e iniciación de sus órganos o estructuras, estudio de fenómenos biológicos vinculados a ciertos ritmos periódicos como la brotación, la floración, la fructificación, entre otros, y relacionados con el medio ambiente donde ocurren. Por otro lado, Ramírez (2014) menciona que los estudios fenológicos de cualquier cultivo, incluyendo al café, sirven para desarrollar modelos de crecimiento y desarrollo, además de apoyar la toma de decisiones a nivel de sistema de producción, incluyendo la apropiada planeación y manejo de prácticas de fertilización, control de enfermedades, arvenses, insectos, entre otras.

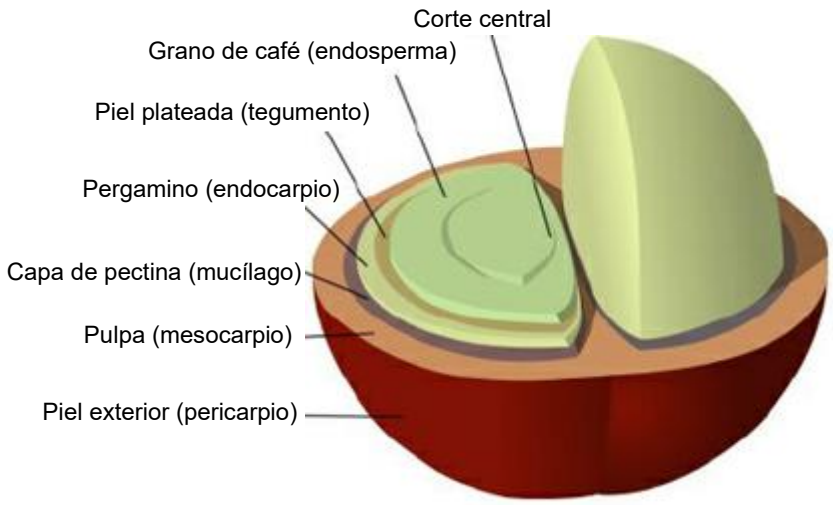


***Figura 1**. Partes de la cereza de café*

Fuente: cultura cafetera, 2014

Con la floración el cafeto inicia su fase reproductiva, los primeros botones florales regularmente aparecen hacia el tercer año de establecimiento del cultivo en el campo, pero su plenitud la alcanzan uno o dos años después; este evento comprende varias etapas: la inducción, la iniciación, la diferenciación, el crecimiento y desarrollo, la latencia y la antesis (Coa Urbaez et al., 2015). De acuerdo con Ramírez (2014) la floración define el número de pases de cosecha y su distribución porcentual a lo largo del año; asimismo, coadyuva a la estimación de factores relevantes para el desarrollo de las cerezas, incluyendo los periodos de mayor presencia requerimiento de agua y de nutrientes de la planta, los más apropiados para fertilización y de control de enfermedades y ataques de insectos como la broca, su vulnerabilidad a déficit hídrico o a defoliación entre otras. Partiendo de los registros de floración se hacen proyecciones del crecimiento del fruto. Para cada floración, independiente de su magnitud, se tendrá una curva de desarrollo de la cereza, por lo tanto, habrá *n* curvas de desarrollo de la cereza como *m* floraciones se presenten. La floración está asociada estrechamente a las condiciones climáticas de cada región; por otro lado, la periodicidad del desarrollo floral en café y su relación con los factores ambientales ha sido examinada en distintas regiones del mundo. De manera general han pactado que el fotoperiodo, la distribución de los períodos húmedos y secos y la temperatura son los principales factores ambientales que la afectan, teniendo como resultado que las floraciones se concentran o dispersan durante el año (Coa Urbaez et al., 2015).

2.1.4 Beneficiado de café

Luego de que las bayas de café alcanzan su madurez se pueden cosechar selectivamente a mano, o cosechar todas las bayas a la vez (mecánicamente). Ambas posibilidades de recolección dan lugar a diferencias distintivas de calidad. Dependiendo de la calidad del café, las bayas se clasifican después de la cosecha para seleccionar las cerezas inmaduras, ya que la presencia de estas últimas puede causar un aumento de la rigidez durante el procesamiento (Huch & Franz, 2014); para mejorar la calidad de los granos del café puede seleccionarse las frutas maduras y no maduras antes de procesarlas. Sin embargo, la mayoría de los productores cosechan todas las bayas juntas (maduras e inmaduras) con la finalidad de minimizar los costos, Huch & Franz (2014) señalan que es un hábito muy común que todas las bayas se procesen y sequen juntas, para que después los granos para el café de alta calidad se clasifiquen. Para poder minimizar la pérdida económica, algunos productores mezclan los granos de mayor calidad con otros de menor calidad.

De acuerdo con el método utilizado para procesar las cerezas de café bien maduras, la producción mundial de granos de café se clasifica como *natural seco*, *despulpado natural*, *casco húmedo* o *totalmente lavado* y se aplican para eliminar el mucílago y reducir el contenido de humedad de la semilla (Poltronieri & Rossi, 2016). Alternativamente, Huch & Franz (2014) consideran que el procesamiento para obtener las semillas se realiza por tres métodos diferentes: *seco*, *húmedo* o semiseco, estableciendo que la diferencia entre ellos no radica solo en el rendimiento, sino también los productos resultantes (granos de pergamino con y sin restos de mucílago o semillas todavía cubiertas por el pericarpio completo) como se observa en la ***Figura 2***. En la mayoría de las fincas, el café se seca hasta quedar con una humedad residual de 13 %, pero esta cantidad puede modificarse dependiendo de la variedad y la preferencia del agricultor enfatizando que los diferentes métodos adoptados varían según las características climáticas de las regiones de producción (Poltronieri & Rossi, 2016).

El proceso de secado natural también conocido como secado al sol, proceso en seco o café sin lavar es el método más simple y antiguo; no se elimina ninguna de las capas de la cereza y puede haber o no fermentación durante el secado. Este proceso proporciona una característica más dulce en el café en comparación con el café lavado y esto se debe a la fermentación de los azúcares de la pulpa; los cafés naturales presentan fragancia (dulce, achocolatada), acidez baja a moderada, cuerpo (cremoso), sabor (notas frutales como fresa, plátano, piña) y resabio (limpio, agradable y prolongado) característicos (Huch & Franz, 2014). El manejo de la cereza debe ser cuidadoso, para evitar el crecimiento de mohos; para ello, las frutas se deben voltear con frecuencia, por lo que este método es laborioso.



***Figura 2**. Procesos de beneficiado del café cereza*

Fuente: Modificado a partir de Pazmiño-Arteaga et al., (2022).

La selección de las cerezas se realiza sumergiéndolas en agua para eliminar aquellas de menor densidad, las cuales son consideradas frutas inmaduras e inadecuadas para el proceso; más tarde se pasan por criba para hacer una segunda selección por tamaño. Posteriormente, las cerezas pasan al secado, lo cual consiste en colocar una capa de cerezas de 10 cm de altura sobre unos soportes denominados camas elevadas o africanas o en las aceras de los patios, durante el días se deben remover hasta obtener una humedad cercana al 10-11%; dependiendo del clima imperante, el secado dura entre 15–25 días. Posteriormente, al café se le remueve la piel y por último se elimina el pergamino por medio de una trilladora. Este método frecuentemente se usa en países como Indonesia, Etiopía, Brasil, y Yemen, en regiones donde las precipitaciones pluviales son menores y los granos pueden exponerse a largos periodos de asoleado (Huch & Franz, 2014).

Los métodos de procesamiento que emplean agua en menor o mayor proporción (despulpado natural, *honey* y lavado) son los predominantes en varios países y se aplican tanto en cafés comerciales como para la producción de cafés especiales. Estos métodos aceleran en mayor o menor medida el proceso de secado y reducen el riesgo de una fermentación excesiva

o el crecimiento de moho al que están expuestos los cafés naturales, pero requieren un suministro abundante de agua, en particular el lavado.

El método semiseco o despulpado natural, es una técnica híbrida de procesamiento húmedo y seco, en el que las cerezas se despulpan mecánicamente para después secarlas mientras las cerezas están parcialmente cubiertas por mucílago (Huch & Franz, 2014). Este método es el que menos depende de la fermentación. Las semillas continúan teniendo piel de pergamino y restos de mucílago. Los azúcares del mucílago se eliminan por fermentación y lavado mecánico; la fermentación se realiza apilando los granos al aire libre y enjuagándolos varias veces con agua y finalmente las bombas centrífugas eliminan el agua. Por otro lado, el despulpado permite un proceso de producción de café en grano más estandarizado y el uso de una despulpadora mecánica permite obtener granos de mayor calidad.

En el procesamiento semiseco de café o *honey* se usan despulpadoras para retirar la piel y la pulpa, dejando cantidades variables de mucílago (20-80 %), luego se llevan rápidamente a secar al sol, o lentamente a la sombra, obteniéndose café *honey* de diferentes colores superficiales, que van desde amarillo a rojo a negro; otros productores añaden otras tonalidades como dorado y morado; en general, el café *honey* amarillo se asemeja más a los cafés lavados, mientras que el negro tiene un perfil de sabor, aroma y sensación bucal más parecido a los naturales. Estos granos de café de calidad también se describen en términos de porcentaje de nivel de mucílago o *miel*. Los granos de café con menos mucílago se secan más rápido, aunque las variedades que tienen la capa de mucílago más gruesa necesitan un tiempo de secado más prolongado. Un café honey amarillo (~25 % de mucílago) normalmente tiene el menor grado de cobertura de nubes o de sombra durante el secado, para acelerarlo a unos ocho días, ganando así su tonalidad característica. A diferencia de la *honey* roja (~50 % mucílago) tarda en secarse alrededor de 12 días y se desarrolla típicamente con cobertura de nubes/sombra, a su vez la *honey* negra suele estar cubierta en su totalidad de mucílago para prolongar el periodo de secado unos 30 días. En cada área, las condiciones climáticas y el nivel inicial de humedad de las cerezas de café contribuyen a la duración del periodo requerido para el proceso de secado (Poltronieri & Rossi, 2016), aunque en términos generales, este método solo se puede emplear en regiones de baja humedad ambiental, para evitar que el secado se prolongue demasiado, previniendo que ocurra una sobre fermentación del producto. Los cafés honey son dulces, más ácidos que los naturales, con un cuerpo más denso que los cafés lavados (Aswathi & Murthy, 2024).

El método húmedo o lavado requiere el uso de equipos específicos y cantidades sustanciales de agua. Si se realiza correctamente, se garantiza que las cualidades intrínsecas

de los granos de café se conserven mejor, produciendo un café verde, que es homogéneo y tiene pocos granos defectuosos. Por lo tanto, el café producido por este método generalmente se considera de mejor calidad y tiene precios más altos. Este método se utiliza para todo el café arábica, excepto en la arábica de Brasil, Etiopía y Yemen (Batista et al., 2016). Solo un pequeño porcentaje del café Robusta se procesa de esta manera. Luego de separar las cerezas inmaduras por flotación como se describió previamente, las maduras se despulpan mecánicamente para eliminar el exocarpio, mientras que el mesocarpio se elimina mediante fermentación sumergida durante 12-36 h, seguido de lavado y secado durante 5-10 días (Huch & Franz, 2014). Los microorganismos que crecen durante la fermentación producen enzimas hidrolíticas que degradan la pectina del mucílago y producen metabolitos secundarios que afectan el perfil de sabor y la acidez del producto en taza. La inmersión en agua genera un café con un sabor considerado como más limpio y en general es un producto más fácil de aceptar por el consumidor promedio (Aswathi & Murthy, 2024). Poltronieri & Rossi (2016) destacan que la fermentación hace que la capa de miel sea viscosa en agua por lo que se puede lavar después de 12-48 h y que luego del secado, el café debe guardase en un almacén por lo menos un mes, para que los niveles de humedad en cada grano se distribuyan uniformemente, el contenido de humedad restante de los granos secos es del 12% (Huch & Franz, 2014). Los granos resultantes después del procesamiento húmedo están cubiertos por una piel de pergamino que se desmorona.

Durante el proceso de secado ocurre una fermentación espontánea, donde la diversidad de bacterias presentes es generalmente mayor que la de levaduras; sin embargo, la microbiota puede cambiar si el tratamiento del café incluye un proceso de lavado secundario para eliminar las impurezas de las cerezas de café. Ferreira et al., (2023) indican que la población microbiana al inicio del secado es mayor en café sin lavar, y el agua promueve una eliminación física de microorganismos, principalmente levaduras. Esta fermentación es facilitada por enzimas nativas en la cereza de café y/o por la microbiota que adquiere del medio ambiente. La microbiota participante depende de la variedad de la planta y la humedad del grano, el método de procesamiento, la capacidad enzimática de las especies colonizadoras, la competencia de sustratos, su actividad antimicrobiana y los factores ambientales (humedad, temperatura, microbiota del suelo) (Huch & Franz, 2014) Generalmente en cualquiera de los tres tipos de fermentación la microbiota que participa incluye bacterias, levaduras y hongos filamentosos; estos microorganismos producen enzimas pectinolíticas y proteolíticas, alcoholes y metabolitos secundarios como ácidos orgánicos que aumentan la acidez, ocasionando que el pH se reduzca de 6.3-4.0, la pectina se hidrolice, y puede reducirse la concentración de cafeína por acción

microbiana (Haile & Kang, 2019; Hatiningsih et al., 2018). Además, algunos microorganismos tienen la capacidad de producir un sabor y aroma especial. La fermentación puede marcar una gran diferencia en cuanto al sabor, el aroma y el cuerpo del café, pero requiere de un control muy minucioso (Consejo Salvadoreño del Café (CSC) et al., s.f.). La falta de control del proceso fermentativo del café es perjudicial porque se pueden formar productos no deseados debido a la fermentación descontrolada, como ácidos butírico o propiónico, o incluso micotoxinas (Ferreira et al., 2023). Ya que la microbiota involucrada es muy diversa, resulta complicado saber con precisión la concentración real de cada microorganismo, aunque el número de bacterias involucradas en las fermentaciones varía de 10^4 a 10^9 UFC/cereza (Huch & Franz, 2014).

Todavía existe un amplio campo de estudio en torno a los efectos del método de procesamiento del café, así como sobre la viabilidad de adoptar métodos naturales o húmedos. Los cafés procesados mediante el método natural tienden a presentar una mayor complejidad en sus compuestos aromáticos, lo que se traduce en un cuerpo más denso (sensación sedosa en boca), menor acidez y un espectro más amplio de notas afrutadas en comparación con los cafés lavados. Por otro lado, los naturales tienden a puntuar más bajo en términos de limpieza, es decir, ausencia de defectos sensoriales, de la taza. También son más vulnerables a los daños, dados los períodos más largos de exposición a agentes externos; por eso son más raros de encontrar entre los cafés especiales. Sin embargo, los naturales de especialidad pueden tener una excelente combinación de sabores claros, que unen matiz y complejidad con gran intensidad y un cuerpo completo, haciéndolos capaces de satisfacer los paladares más exigentes. Considerando la relevancia que la microbiota inicial de la cereza de café tiene sobre la elaboración de la bebida, en particular en el beneficiado natural, en las secciones subsecuentes se abordarán las particularidades de los microrganismos que inciden en las características finales del café en taza. (Poltronieri & Rossi, 2016).

2.2 Características sensoriales del café

2.2.1 Precursores de aroma y sabor

El proceso de tostado es el responsable de las reacciones químicas donde a partir de la degradación de compuestos no volátiles del café verde (ácidos cloragénicos, cafeína, trigonelina, ácidos orgánicos no aromáticos, minerales, entre otros) se obtienen compuestos con atributos especiales de sabor; de forma más concreta la composición química del café incluye lípidos , proteínas, aminoácidos, carbohidratos y ácidos nucleicos, los cuales están relacionados con la presencia de precursores de sabor y aroma de la bebida que se obtiene después extraer el café tostado y molido, por lo tanto, la calidad del café verde es crucial para asegurar características

sensoriales especiales de la bebida final. El contenido de lípidos en granos de café es aproximadamente 15% y dentro de estos podemos encontrar triglicéridos, esteroles esterificados y diterpernos (principalmente kahweol y cafestol), estos compuestos aportan sensaciones en boca como cuerpo y textura; por otra parte los carbohidratos representan aproximadamente el 60% de la composición y la finalidad de estos es la formación de aroma, sabor y color en el proceso de tostado; los más importantes son sacarosa y polisacáridos, estos últimos durante el proceso de tostado se convierten en azúcares reductores como manosa, arabinosa o glucosa. La sacarosa está asociada positivamente con características de acidez y dulzura; y se ha observado que este compuesto en presencia de ácidos orgánicos da un puntaje sensorial final alto en café de especialidad, por otro lado, los azúcares reductores son fundamentales para llevar a cabo la reacción de Maillard. Por otra parte, las proteínas constituyen una minoría con apenas un 10% en la composición y son considerados precursores de sabor y aroma; en *C. arabica* los principales aminoácidos son ácido glutámico, ácido aspártico y ácido ɣ- aminobutírico (GABA); la concentración de estos disminuye a temperaturas de 180°C después del tostado y reaccionan con los azúcares reductores dando como resultado pirroles, piridinas, y pirazinas. Se ha reportado que los ácidos clorogénicos (CGAs), polisacáridos y proteínas trabajan en conjunto para llevar a cabo la formación de melanoidinas, quienes tienen una influencia sensorial positiva al asociarse con una disminución del sabor desagradable sulfuroso/tostado en la bebida de café. (Quintanilla-Casas et al., 2015; Laukaleja & Kruma, 2019; Laukaleja & Kruma, 2018)

Además de los compuestos ya mencionados, las plantas de café también producen metabolitos secundarios únicos que se acumulan en las semillas, dentro de estos se encuentran los ácidos clorogénicos (CGAs), cafeína y trigonelina. Los CGAs son un grupo fenólico de ésteres de ácido cafeico y ferúlico, presentes en concentraciones de 70-350 mg por taza de café ; los más importantes son: ácido clorogénico (5-CQA) y sus isómeros: ácido neoclorogénico (3-CQA) y ácido criptoclorogénico (4-CQA); se caracterizan por presentar inestabilidad térmica lo que significa que dependiendo del grado de tostado, la presencia de estos puede reducirse a menos del 1% del contenido inicial, las importancia de estos en el café de especialidad es que aportan calidad al café tostado ya que le brindan astringencia, amargor y acidez a la bebida; sin embargo si antes del tostado se llevan a cabo reacciones de oxidación de alguno de estos compuestos se pueden producir sabores indeseables (Awwad et al., 2021; Dong et al., 2023; Pérez-Ochoa, 2016). De igual importancia es la cafeína; su biosíntesis comienza a partir de la xantosina, que se produce como un catabolito de los nucleótidos de purina; se caracteriza por permanecer relativamente estable durante el proceso de tostado, se ha demostrado que su concentración es

mayor en tostados claros que en oscuros y aunque una de sus características es aportar amargor a la bebida de café, es responsable de no más del 10% del sabor amargo percibido.

Otro alcaloide importante es la trigonelina que se encuentra ampliamente distribuida en el reino vegetal y se han reportado de valores en C. *arabica* que varían de 1.52-2.90%; ya que la presencia de este compuesto en café verde depende de la especie y al estar presente en mayores cantidades en C. *arabica* en comparación con C. *robusta* es un marcador que ayuda a distinguir entre estas especies, durante la maduración de la cereza de café los contenidos de este compuesto varían muy poco y es hasta que se lleva a cabo el proceso de tostado que se degrada en pirroles y pirazinas, dando aromas y sabores positivos, acidez y dulzor (Laukaleja & Kruma, 2018; Pérez-Ochoa, 2016).

El proceso de tostado tiene un efecto significativo sobre la composición de los granos de café, ya que este sufre cambios físicos, químicos y sensoriales; y aunque los compuestos volátiles comprenden una pequeña proporción su contribución es importante ya que dan características únicas de sabor, se ha encontrado que con tostado ligero y medio, las extracciones de café son más intensas con notas frutales, ácidas y cítricos; a diferencia del tostado oscuro que pierde aromas agradables y los compuestos de sabor y lo que se percibe son notas tostadas y quemadas; es importante considerar que, además del tiempo y temperatura de tostado, los perfiles aromáticos del café son dependientes de la especie, variedad, región de origen, tipo de fermentación, almacenamiento, empaque y método de extracción. Se considera que existen más de 850 volátiles en el café tostado, en la ***Tabla 1*** se muestran los grupos más importantes que inciden sobre el sabor y aroma del café, dentro de los compuestos detectados, el 3-mercapto formiato de 3-metilbutilo, metanotiol, β-damascenona, metilpropanal, 2-/3-metilbutanal, 2-etil-3,5-dimetilpirazina, 2,3-dietil-5-metilpirazina y el 4-vinilguaiacol son los olores esenciales del café tostado y por último el furfuritiol (FFT), contribuye al olor tostado y azufrado, así como al aroma fresco. Para realizar el proceso de tostado se recurre a la curva de tueste, esta es una herramienta que ayuda a controlar el proceso para asegurar un sabor y aroma en equilibrio, en el gráfico se puede observar los cambios de temperatura en el grano lo que ayuda a ir controlando la cantidad de calor que se aplica y el tiempo que debe de durar el proceso. La curva tiene 4 fases: deshidratación, reacción de Maillard, primer *crack* y segundo *crack*; durante la fase de deshidratación se comienza con una redistribución de agua ya que se extrae del 10 al 12% de la humedad de grano, en esta fase no se produce ningún significativo en sabor y aroma; después en la fase de Maillard la temperatura comienza a aumentar y comienzan las reacciones entre azúcares y carbohidratos que dan como resultado aromas característicos en el café; posteriormente en la etapa del primer *crack* los granos se expanden debido a la liberación de

gases, y finalmente la última etapa de la curva, el segundo *crack*, es donde los granos de café alcanzan el tueste alto y los granos se expanden un poco más. (Cerny et al., 2021; Cordoba et al., 2020; Laukaleja & Kruma, 2019; Laukaleja & Kruma, 2018; Seninde & Chambers, 2020).

Tabla 1. Principales compuestos aromáticos en café.

Grupo funcional	*Compuesto*
Ácidos	Ácido 2 - metil - 1 - butanoico
	Ácido 3 - metil - 1 - butanoico
Furanonas	4 - hidroxi - 2,5 - dimetil - 3(2H)- furanona
	3 - hidroxi - 4,5 - dimetil - 2(5H)- furanona
	5 - Etil - 3 - hidroxi - 4 - metil - 2(5H) - furanona
Cetonas	2,3 – Butanediona
	2,3 – Pentanediona
	2 - Hidroxi - 3,4-dimetil-2-ciclo-penteno-1-ona
Compuestos fenólicos	Guayacol
	4-etilguayacol
	p-vinilguayacol
	Vainillina
Pirazinas	3-isopropil-2-metoxipirazina
	2-etil-3,5-dimetilpirazina
	3,3-Dietil-5-metilpirazina
	3-Isobutil-2-metoxipirazina
Tioles	2-Furfuritiol
	3-Mercapto-3-metil-1-butanol
	3-mercapto-3-metilbutilformiato

Fuente: Modificado a partir de Lee et al., (2015)

2.2.2 Métodos analíticos de detección de precursores y aromáticos de café

El criterio más frecuentemente aplicado para evaluar la calidad del café en taza engloba a la cafeína, trigonelina y ácidos clorogénicos; estos compuestos son metabolitos secundarios resultantes de las rutas bioquímicas que se llevan a cabo en la planta y son los responsables del color, aroma, acidez y astringencia de las bebidas de café. Algunos parámetros ambientales como la altitud, cambios en la temperatura, volumen y distribución de las lluvias, así como las cualidades físicas y química del suelo. Se han reportado diferentes métodos para determinar simultáneamente estos compuestos, entre los que destacan la espectroscopía UV-Visible, y la cromatografía de líquidos de alto desempeño (HPLC) con detector de arreglo de diodos (DAD) o por exclusión de tamaño (SEC), en fase reversa (RF) y acoplada a espectrometría de masas (MS). Diferentes investigaciones han reportado la cuantificación de estos compuestos con

diversos objetivos, por ejemplo, Marín-García (2008) analizó por HPLC granos de *Coffea arabica* variedades Típica, Bourbon, Caturra y Colombi; y de C. *canephora* var. Robusta recolectadas en diferentes semanas de floración, encontrando una mayor cantidad de ácidos clorogénicos en robusta en comparación con arábica; por otro lado, Awwad et al., (2021) cuantificaron cafeína y ácido clorogénico en muestras de café verde y tostado usando HPLC-DAD, encontrando una correlación positiva entre los niveles de cafeína con el grado de tueste y una correlación negativa entre los niveles de ácido clorogénico con el grado de tueste, mostrando que el origen de las muestras de café no mostraron un efecto sobre las variables estudiadas. Por otra parte, Wale et al., (2024) caracterizaron café verde (*Coffee arábica* L.) para exportación reportand diferencias eno los niveles promedio de cafeína, ácidos clorogénicos y trigonelina por región de producción empleando estos resultados como base para proponer esquemas diferenciados de comercialización dependientes de la concentración de precursores.

Por otro lado, la técnica de cromatografía de gases acoplada a espectometría de masas (GC-MS) ha cobrado importancia en el análisis de metabolitos de café con distintos fines, incluyendo la identificación de adulteraciones en café tostado, Otra aplicación de esta técnica deriva del crecimiento del mercado de cafés diferenciados donde los productores han desarrollado técnicas postcosecha de fermentación sin tomar en cuenta las variables asociadas al proceso de transformación de café; a partir de esta premisa, Pazmiño-Arteaga & Ruiz-Márquez, (2023) evaluaron diferencias en los compuestos volátiles aromáticos de café arábica variedad caturra de tres orígenes geográficos diferentes pero procesados bajo el mismo método (fermentación húmeda) donde se observó que las muestras aun con la misma genética y proceso de fermentación presentan diferencias relacionadas a las variables agroecológicas de la región donde se siembra el café.

2.2.3 Atributos sensoriales del café de especialidad

El sistema de análisis sensorial de café es la captación o degustación en taza que se realiza por medio de la metodología de la Asociación de Cafés Especiales (SCA), esta asociación comenzó sus actividades en enero del 2017 como resultado de la unión de la Asociación de Cafés especiales de Europa (SCAE) y de América (SCAA); los miembros de esta asociación incluyen productores, tostadores y baristas. Uno de sus objetivos es la redacción de estándares, los cuales incluyen aquellos con especificaciones y métodos de prueba para molienda de café (SCA-320), funcionamiento de máquinas de expreso automáticas y semiautomáticas (SCA-350) y para extracciones de café (SCA-310).

La SCA define al café de especialidad en su estado verde como aquel grano que se encuentra libe de defectos primarios, tiene el tamaño y secado adecuado, no presenta manchas y tiene atributos sensoriales distintivos; lo que significa que el café debe pasar pruebas de catación en taza; después de tostarlo y antes de la extracción la muestra debe pasar por una molienda, donde los compuestos aromáticos delicados son susceptibles de volatilización, motivo por el cual la evaluación debe realizase inmediatamente después de la molienda. El Comité de Normas Técnicas de la SCA recomienda que los catadores certificados (Q-grader) evalúen el café con una molienda media de grano que debe ser colocado en 5 tazas con exactamente la misma cantidad de muestra (g) y agua caliente (°C); también se utiliza un léxico sensorial para nombrar los atributos sensoriales primarios; por otro lado el Instituto de la Calidad del café (CQI) introdujo en su forma de cata un análisis sensorial descriptivo para medir la diferencia en intensidad de cada descriptor; en la ***Figura 3*** se observa la rueda de sabores de la catación de café (© 2016) de la SCA, esta se basa en el trabajo colaborativo entre profesionales sensoriales, científicos, productores de café y empresas tostadoras, esta herramienta es primordial para la preparación de catadores quienes tienen que aprender a identificar estas notas en el café, dentro de las cuales se incluyen defectos (off notes) que pueden estar asociados a un mal procesamiento de fermentación o tostado otra herramienta que puede utilizarse para preparar paneles de cata es *La Nariz del Café* ®, que son un conjunto de 36 esencias desarrolladas para el estudio de aromas de café, por medio de la identificación y memorización de un conjunto de familias aromáticas.

Para llevar a cabo la evaluación de muestras, la SCA proporciona un formulario de cata, que se observa en la ***Figura 4,*** donde se debe ir registrando la calificación de 0 a 10 de los siguientes atributos:

- Fragancia y aroma de café: el primer término se refiere al olor del café molido y el segundo a el olor que desprende el café una vez que se realiza la infusión en agua caliente.
- Regusto de sabor: se define como la duración del sabor una vez que se ha tomado el café; la percepción de cambios abruptos se califica con una puntuación baja.
- Acidez del café: este parámetro dependerá de la procedencia de la cereza de café, variedad, así como su proceso fermentativo.
- Cuerpo del café: con este parámetro se califica la sensación en boca, algunos pueden sentirse más densos o viscosos y otros más acuosos.

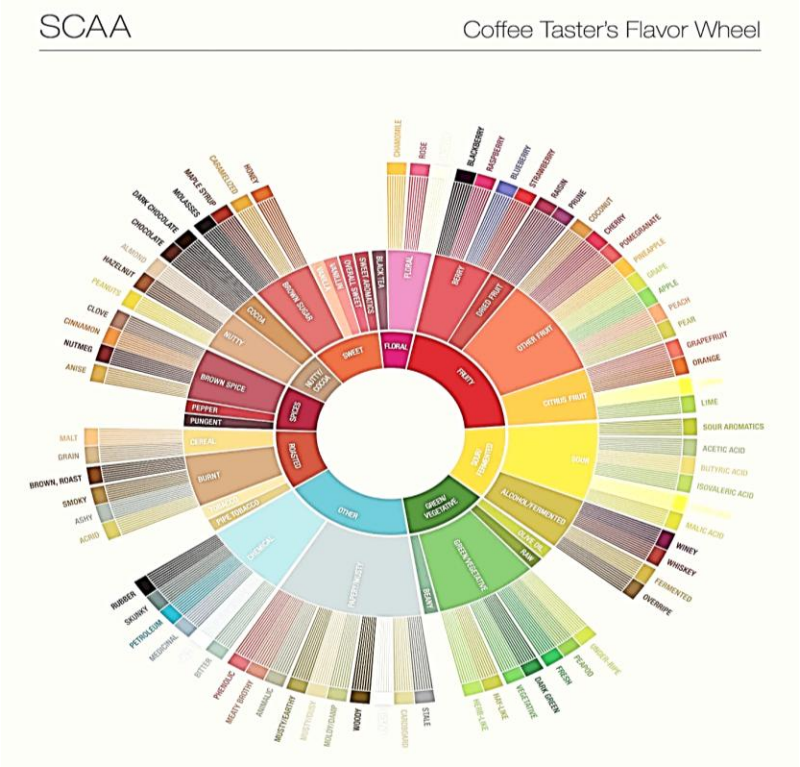


Figura 3. *Rueda de sabores para catación de café*

Fuente: SCA, 2024

- Balance: mediante este parámetro se mide el equilibrio entre acidez, aroma, sabor y regusto; si alguno de estos sobresale por ser muy intenso o por ser débil se asigna una puntuación baja.
- Dulzor: mide el nivel dulce
- Taza limpia: se mide la uniformidad del sabor desde el primer sabor hasta al regusto.
- Uniformidad de sabor: se refiera a la consistencia del sabor entre las 5 tazas evaluadas.
- Atributos generales: este parámetro el Q-grader evalúa de acuerdo con su consideración personal.

La puntuación general se basa en la experiencia de sabor del Q-grader como valoración personal; los atributos de sabor específicos son puntuaciones positivas de calidad y los defectos son puntuaciones negativas que denotan sensaciones de sabor desagradables que afectan la calidad del café; al final las calificaciones deben ser sumadas y se evalúan de la siguiente manera: 90-100 (Destacada), 85-89.99 (Excelente), 80-84.99 (Muy bueno) y menor a 80 (por debajo del café de especialidad) (Cruz-O'Byrne et al., 2020a; Poltronieri & Rossi, 2016; Quiñones-Ruiz, 2020)

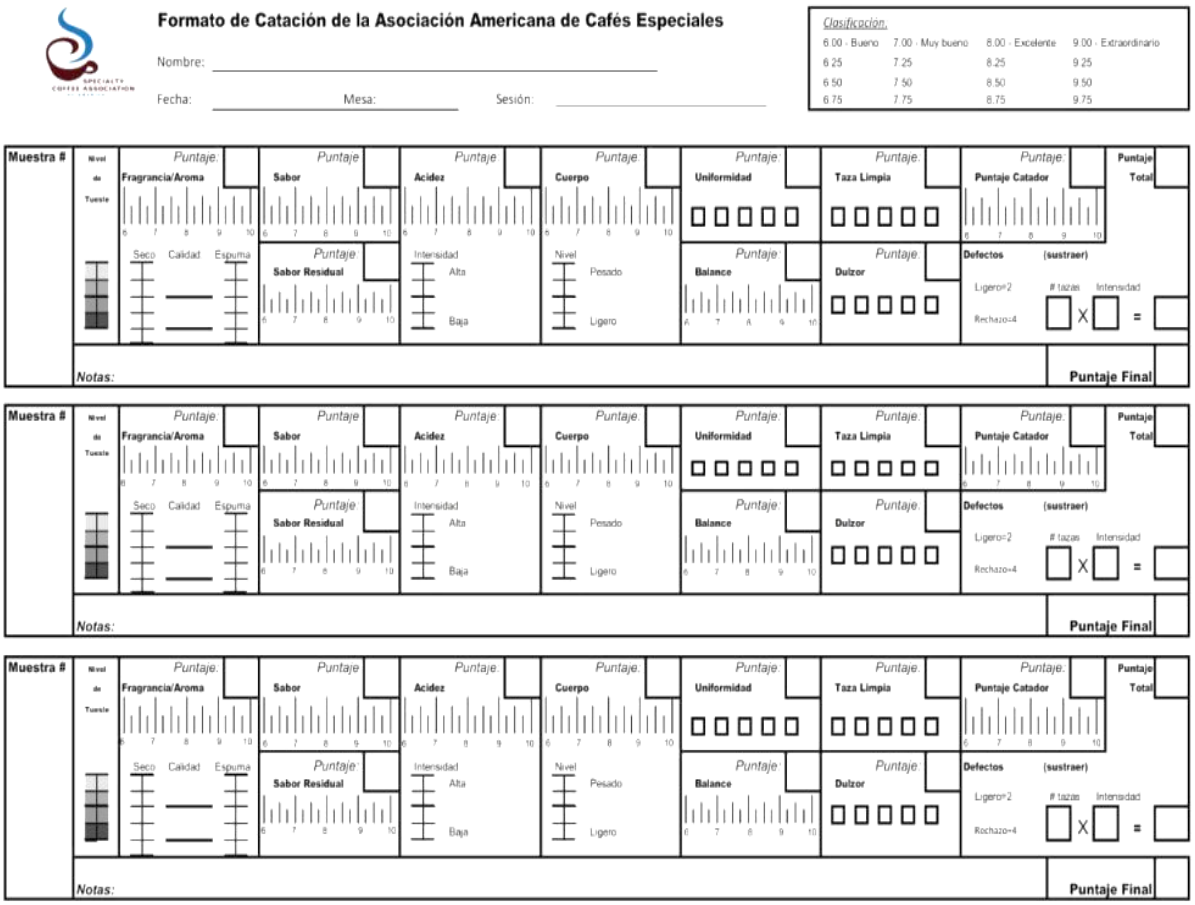


***Figura 4**. Formato de catación de la SCA*

Fuente: SCA 2024

La composición química del café en taza es una mezcla compleja de compuestos provenientes del café verde, generados durante la fermentación o el mismo tostado, que produce características sensoriales que definen la calidad del mismo; las propiedades sensoriales del café han sido ampliamente estudiadas debido al incremento del consumo a nivel mundial, el interés por el sabor y el aroma del café ha cobrado importancia desde el área científica pero también de la industria, lo que ha llevado al uso de descriptores (café, tostado, acre, nuez, cocoa, terroso, floral, frutal, verde, aromático dulce, aromático amargo, pungente), la medición de estas características debe realizarse por medio de panelistas entrenados. Además del aroma y el sabor, la textura y sensación en boca son otros elementos que influyen en la percepción del sabor y están influenciados por la interacción que existe entre la estructura de los alimentos con la superficie de la boca y lengua debido a la sensibilidad química; el lenguaje sensorial de café asociado a estos elementos incluyen atributos cuerpo (viscosidad), astringencia, redondo, liso, espeso, áspero, granulado, aceitoso, pegajoso, con impresiones generales como suave,

delicado, equilibrado, pesado, ligero, picante, alcalino, fácil de tragar y refrescante. Es importante considerar que la información sensorial relacionada con las propiedades aromáticas del café, por sí sola y sin una correlación con datos de composición química, no permite explicar completamente el origen de los atributos sensoriales específicos (Sunarharum et al., 2014).

2.2.4 Café de especialidad

El mercado internacional del café se ha transformado a lo largo de los últimos 10 años debido al crecimiento de la demanda del café de especialidad. La definición de café de especialidad no está del todo definida, pero suele referirse a cafés con cualidades únicas de sabor y se diferencian por sus atributos sensoriales (aroma y cuerpo) (Collazos-Escobar et al., 2019). Este producto suele ser el mercado de especialidad, donde los precios alcanzan hasta seis veces el valor de un café tradicional.

Es reciente el nicho de mercado para cafés de especialidad de alta calidad con sabores únicos y son organizaciones certificadas como la SCA quienes definen los parámetros y características que debe cumplir un café para ser considerado de especialidad y lo hacen empleando protocolos de catación formalizados para la preparación y evaluación hedónica del café (Velásquez et al., 2019). La SCA definió metodologías estandarizadas para evaluar la calidad sensorial del café. El método consiste en un análisis sensorial emitido por *Q-graders* certificados, utilizando muestras de café tostado; en la prueba de cata, las muestras se evalúan en relación con 10 atributos primarios del café: fragancia/aroma, sabor, regusto, acidez, cuerpo, uniformidad, equilibrio, dulzura, limpieza en taza y puntuación (defectos y atributos generales) (Ferreira et al., 2023). El puntaje general se basa en la experiencia de sabor del catador como una evaluación personal. Los defectos son puntuaciones negativas que denotan sensaciones de sabor desagradables que restan valor a la calidad del café. La SCA, utiliza una escala de 100 puntos para la calidad total, y un café debe lograr una puntuación acumulada de 80 o más para ser considerado de especialidad. La puntuación total se calcula como la suma de los 10 atributos, con una nota final que resulta de las deducciones por posibles defectos (Velásquez et al., 2019).

Poltronieri & Rossi (2016) mencionan que hasta el momento en que el café tostado se elabora y se transforma en una bebida, el café de especialidad solo es una posibilidad, la mayoría de los cafés de especialidad se producen a través del proceso húmedo, en el que la piel y la pulpa de la cereza se eliminan mecánicamente, el café despulpado se fermenta y se lava para eliminar el mucílago, las semillas se secan para producir café pergamino. El tiempo que transcurre entre la cosecha y el comienzo del procesamiento puede tener un impacto drástico en

los resultados finales del café, por lo tanto, el café de especialidad depende de una entrega rápida desde el árbol hasta el beneficio (Velásquez et al., 2019).

A la fecha, se han identificado varios puntos críticos de control de calidad para los productores y procesadores de café de especialidad. Entre estos se incluyen la recolección de cerezas con un grado de madurez adecuado, el monitoreo y control de las condiciones de fermentación, y la garantía de un contenido de humedad suficientemente bajo en el café pergamino durante el proceso de secado (Velásquez et al., 2019). El secado constituye otra etapa crítica, ya que, si se realiza demasiado rápido o lento, de forma desigual, insuficiente o seguido de un rehumedecimiento puede resultar adverso para la calidad final del café.

Una vez concluido el secado, el café debe reposar antes de pasar por las últimas etapas de procesamiento y preparación para su envío. En esta fase, factores como la humedad relativa, la temperatura, los contenedores y las condiciones de almacenamiento adquieren una importancia crucial. Posteriormente, el café debe ser descascarillado, clasificado por tamaño y empacado para su exportación, etapas que también son consideradas puntos críticos en la cadena de valor. Además, Poltronieri y Rossi (2016a) destacan que el cuidado de las plantas es esencial para preservar la más alta calidad de las bayas de café.

De todos los factores mencionados, Velásquez et al., (2019) sostienen que probablemente el aseguramiento de una madurez uniforme y adecuada en la cosecha representa el mayor desafío para los pequeños productores. Aunque la madurez de la cereza puede describirse en términos de días posteriores a la floración, en la práctica es más común y sencillo utilizar el color del fruto como indicador. Otras formas de evaluación incluyen la firmeza de la cereza, la acidez titulable, el contenido de azúcar y la densidad, parámetros que están bien correlacionados con el color y que, por lo general, no presentan dificultades significativas para su medición en campo.

Las cerezas verdes indican inmadurez, mientras que las maduras pueden presentar tonalidades rojas, naranjas, rosadas o amarillas, dependiendo de la variedad. El control de la fermentación es especialmente importante, debido a su influencia en el desarrollo de precursores de aroma y sabor que contribuyen a la calidad del café de especialidad (Gomes et al., 2022).

2.2.5 Métodos sensoriales aplicados a café.

El café puede clasificarse como *de especialidad* una vez que se lleva a cabo una cata de acuerdo con el protocolo de la SCA. Los puntajes que se pueden dar son los siguientes: por debajo de especialidad (<80), muy bueno–especialidad (80-84.99), excelente–especialidad (85-89.99) y sobresaliente–especialidad (90-100). Las bebidas de café son evaluadas por parte de

un panel de catadores especializados con un certificado Q-Grader. Los atributos sensoriales calificados son fragancia, aroma, sabor, retrogusto, acidez, cuerpo, equilibrio, uniformidad, taza limpia, dulzura, defectos e impresión general; después del paso gustativo, los catadores dan una descripción de las características sensoriales y una calificación de calidad final con un puntaje entre 0-100 (Cruz-O'Byrne et al., 2020b).

Además de la metodología desarrollada por la SCA, se han empleado otras técnicas de análisis sensorial tanto con jueces entrenados como con consumidores. Dentro de estas últimas, destaca el análisis *Check All That Apply* (CATA), el cual ha demostrado ser eficaz en la evaluación de muestras complejas y en la correlación de estas con datos fisicoquímicos. Esta metodología se caracteriza por ofrecer respuestas rápidas, a bajo costo, con un formato simple y de bajo esfuerzo cognitivo. Su objetivo es obtener una descripción sensorial directa por parte del consumidor, lo que facilita la caracterización sensorial del producto.

Los consumidores de alimentos y bebidas tienden a asociar aspectos fisicoquímicos, sensoriales y microbiológicos al momento de elegir un producto. En este sentido, las variaciones sensoriales del café pueden comprenderse mejor cuando se relacionan con parámetros fisicoquímicos. Por ejemplo, la acidez —un atributo importante en la percepción del café— depende de la composición de los ácidos volátiles (como el ácido acético y fórmico) y no volátiles (como el ácido clorogénico, málico y quínico). Asimismo, el amargor, atribuido a la cafeína, está relacionado con compuestos bioactivos como la trigonelina y el ácido clorogénico. En un estudio realizado por Neves et al., (2023), se encontró que, al aplicar la metodología CATA en matrices complejas como el café, es recomendable seleccionar consumidores habituales del producto, ya que están más familiarizados con sus características y, por tanto, pueden responder con mayor precisión a las preguntas sensoriales.

Otra prueba sensorial que se desarrolla con un panel entrenado es el análisis descriptivo cuantitativo (QDA), el cuál después de la fase de formación, los evaluadores desarrollan atributos cualitativos y proporcionan datos cuantitativos sobre la intensidad de cada uno. Kreuml et al., (2013), aplicaron un análisis QDA para evaluar las diferencias sensoriales en café tostado durante el almacenamiento (9 y 18 meses) empleando un panel de 10 evaluadores que midieron la intensidad de 30 atributos, donde se encontró que los olores y aromas disminuyen su intensidad durante el almacenamiento. (Le Quéré & Schoumacker, 2023)

Palczak et al., (2019) señalan que, en el ámbito de los alimentos, la complejidad sensorial suele estudiarse en función de una sola característica sensorial (como la apariencia, el aroma o el sabor), prestando poca atención a la dimensión temporal de dicha complejidad. En este contexto, se ha propuesto el uso del concepto de Dominancia Temporal de Sensaciones (TDS,

por sus siglas en inglés), el cual permite evaluar cómo varían las sensaciones percibidas a lo largo del tiempo durante el consumo de un producto. Este tipo de prueba mide el dominio de la sensación con base a la característica sensorial que atrae más asumiendo que la complejidad sensorial está relacionada con el número de sensaciones percibidas o el número de veces que la sensación dominante cambió, desde el momento en que el alimento es introducido a la boca hasta la sensación residual que este provoca. La prueba consiste en proporcionar al evaluador una lista de atributos sensoriales, previamente establecida con jueces entrenados. Durante la degustación del alimento, el evaluador debe indicar cuál de los atributos de la lista percibe como *dominante* en ese momento. Cada vez que considera que la percepción sensorial dominante ha cambiado, debe seleccionar el nuevo atributo que ahora predomina. Para realizar esta prueba es necesario el uso de un software especializado, el cual se encarga de recopilar y procesar los datos obtenidos. Con esta información se generan las llamadas *curvas de tasa de dominancia*, que representan el porcentaje de evaluadores que identificaron un determinado atributo como dominante en un instante específico del tiempo. Valores altos en estas curvas indican un alto grado de consenso entre los evaluadores respecto al atributo percibido como dominante en ese momento. Barbosa et al., (2019). evaluaron extracciones de café Arabica con diferentes niveles de tostado por medio del análisis TDS, encontrando que el gusto amargo, el sabor a tostado y el gusto ácido son los atributos más relevantes para discriminar bebidas de café; los primeros dos atributos se asocian a extracciones de café con tostado oscuro y la última con un tostado medio claro. Las aplicaciones sensoriales en café tienen una amplia oportunidad de crecimiento, especialmente con el uso de metodologías rápidas que permiten identificar las características dominantes en el producto y que facilitan la selección de cierto producto en específico.

2.3 Microbiota del café y procesos fermentativos

2.3.1 Microbiota nativa del café

Los microorganismos que se encuentran en el café provienen de múltiples y diferentes ecosistemas, como el agua, el suelo, el aire, la planta, la superficie de las cerezas, los insectos, especies/variedades de café, la región de cultivo, la mano de los trabajadores, máquinas y herramientas, además del origen y factores geográficos como la altitud y el clima (Elhalis et al., 2023; Ferreira et al., 2023). La población microbiana presente en las cerezas de café es diversa y de alta densidad de población e incluye levaduras, bacterias y hongos filamentosos, aunque su población inicial varía por la influencia de los factores antes mencionados.

Debido a que la microbiota del café está presente en la cereza recién cosechada, se considera que se lleva a cabo la fermentación espontánea una vez que se realiza el corte de los

frutos y antes de pasar a alguna de las etapas posteriores del procesamiento. En la ***Tabla 2*** se muestran las especies microbianas identificadas durante la fermentación natural (espontánea) del café seco. Los géneros de bacterias más comunes presentes durante la fermentación del café son *Bacillus, Lactobacillus, Acinetobacter, Arthrobacter* y *Weissella* y de levaduras son *Pichia, Saccharomyces, Rhodotorula, Candida, Kluyveromyces y Hanseniaspora.* (Martins et al., 2020). Los microorganismos nativos del café son endófitos (crecen al interior de la planta) o epífitos (colonizan la superficie de las plantas), principalmente mesófilos y su diversidad y dominancia en la fermentación son variables; los microorganismos epífitos y la microbiota dominante pueden verse afectados por la temperatura, pH, humedad, composición de la pulpa, el mucílago, la aireación, región y altitud; por este motivo, algunas cepas se encuentran específicamente en determinados países o regiones (Ferreira et al., 2023).

Además de las técnicas tradicionales de enumeración e identificación microbiana, las tecnologías de secuenciación de próxima generación (NGS) han abierto nuevas fronteras en el análisis de la microbiota al proporcionar una gran cantidad de información para identificar los filotipos microbianos presentes en diferentes muestras (Fantini et al., 2015). Se sabe que más del 99 % de los microorganismos ambientales no son cultivables con los métodos de laboratorio convencionales, por lo que su identificación depende en gran medida de la secuenciación del ADN de muestras. La llegada de la NGS impulsó estos estudios y ha revolucionado la comprensión de la microbiota de muestras complejas, la cual, combinada con el desarrollo de herramientas bioinformáticas avanzadas, ha impulsado los estudios metagenómicos basados en el gen ARNr 16S (Fantini et al., 2015). La disponibilidad de plataformas NGS es cada vez más amplia, que incluyen pirosecuenciación (454), secuenciación basada en semiconductores (como el Ion Torrent), secuenciación por síntesis (Illumina), secuenciación por ligación (SOLiD) y secuenciadores de tercera generación, cada uno basado en una química de secuenciación distinta (Soni et al., 2022). La caracterización de comunidades microbianas se basa en la secuenciación de nueva generación (NGS) del gen del ARN ribosomal 16S, ampliamente reconocido como un marcador filogenético robusto. Este enfoque permite obtener una resolución taxonómica precisa de la población microbiana presente en una muestra ambiental. El gen 16S rRNA contiene nueve regiones hipervariables (V1–V9), cuya selección representa un desafío metodológico, ya que la capacidad de discriminación filogenética y la estimación de abundancias relativas varían entre regiones y taxones que conforman la comunidad microbiana. Sin embargo, los perfiles generados pueden presentar sesgos derivados de factores experimentales y computacionales, como la elección de cebadores, la región objetivo del gen, la plataforma de secuenciación empleada y la calidad de las lecturas obtenidas (Onywera & Meiring, 2020).

Tabla 2. Especies microbianas identificadas durante la fermentación natural de café.

Bacterias	Levaduras	Hongos filamentosos
Erwinia dissolvens	*Debaryomyces hansenii*	*Cladosporium cladosporioides*
Enterobacter aerogenes	*D. polymorphus*	*Fusarium lateritium*
E. cloacae	*Pichia guilliermondii*	*F. solani*
Klebsiella spp.	*P. anómala*	*F. illudens*
Tatumella ptyseos	*P. holstii*	*F. moniliforme*
Pseudomonas putrefaciens	*P. burtonii*	*F. nivale*
P. paucimobilis	*P. ofunaensis*	*Pestalotia* sp.
Proteus mirabilis	*Arxula adeninivorans*	*Paecelomyces* sp.
Acinetobacter sp.		*Penicillium minioluteum*
Bacillus subtilis		*P. roquefortii*
B. macerans		*P. solitum*
B. megaterium		*P. funiculosum*
B. cereus		*P. brevicompactum*
Leuconostoc holzapfelii		*P. chrysogenum*
Lactobacillus sp.		*P. purpurogenum*
		Aspergillus flavus

Fuente: Elhalis et al. (2023).

La técnica Ion Torrent no depende de la detección óptica y se basa en la identificación de iones hidrógeno liberados durante la incorporación de nucleótidos por la ADN polimerasa. Cuando esta enzima incorpora un nucleótido a una hebra de ADN en crecimiento, se libera un protón como subproducto, cuya detección permite inferir la secuencia de la molécula. Entre las ventajas de Ion Torrent se encuentra su capacidad para generar longitudes de lectura de aproximadamente 200 pares de bases (pb), aunque se han reportado lecturas de hasta 400 pb, útiles para llenar vacíos en ensamblajes generados por otras tecnologías (Fantini et al., 2015).

En contraste, la plataforma *Illumina* utiliza una química de síntesis para la secuenciación. Ambas plataformas presentan diferencias importantes en cuanto al método de preparación de bibliotecas, la longitud de lectura, la calidad de los datos, el rendimiento por corrida, las tasas de error de secuenciación y los sesgos introducidos, factores que en conjunto pueden influir significativamente en el perfil de microbiota obtenido (Soni et al., 2022).

Por ejemplo, la tasa de error promedio en las lecturas de la plataforma Ion Torrent PGM (Personal Genome Machine) es de aproximadamente 1.5 errores por cada 100 bases para

lecturas directas y 1.4 para lecturas inversas, mientras que la plataforma Illumina MiSeq reporta una tasa menor, de 0.9 errores por cada 100 bases. Por lo tanto, la selección de la plataforma y de las especificaciones de secuenciación óptimas representa un desafío importante para los investigadores (Onywera & Meiring, 2020).

2.3.2 Fermentación controlada

Más allá de cosechar cerezas de café de alta calidad, la industria cafetalera y los productores están implementando en sus procesamientos la fermentación controlada para obtener las características deseadas, en términos de sabores, proteólisis, lipólisis, la síntesis de compuestos volátiles (aldehídos y cetonas), ácidos grasos libres y acidez (ácido/cítrico) en el producto La fermentación inducida no es obligatoria y puede realizarse con café natural o despulpado, en biorreactores con o sin agua, con o sin adición de cultivo iniciador, y en diferentes condiciones de disponibilidad de oxígeno (Poltronieri & Rossi, 2016).

Ferreira et al., (2023) definen a los cultivos iniciadores en la fermentación del café como microorganismos preseleccionados, compuestos básicamente por uno o múltiples cultivos microbianos con alta concentración celular, capaces de colonizar el producto y dominar la alta población de microorganismos naturalmente presentes en el medio a lo largo del proceso fermentativo. El uso de cultivos iniciadores puede reducir el tiempo de fermentación y transformar un proceso inconsistente en una propuesta económicamente viable, mejorando la calidad al proporcionar un mejor control de la fermentación y previsibilidad del producto final.

La estrategia más común es seleccionar y utilizar una única levadura o bacteria como cultivo iniciador, aunque es posible utilizar múltiples cepas como cultivo iniciador. La selección de cultivos iniciadores para la fermentación del café se realiza con frecuencia empleando cepas identificadas en el fruto del café o en el proceso fermentativo espontáneo (Ferreira et al., 2023). Los microorganismos seleccionados como cultivos iniciadores deben ser no patogénicos, no tóxicos y adaptables a las materias primas y al proceso (Haile & Kang, 2019), también deben producir calidad sensorial, prolongar la vida útil, reducir tiempo de procesamiento y reprimir el desarrollo de patógenos relacionados con los alimentos. El uso de cepas previamente seleccionadas da como resultado una mayor uniformidad en la población microbiana y, en consecuencia, de los metabolitos generados.

Las cepas para conformar los cultivos iniciadores para café se evalúan por su capacidad de crecer en rango de pH (pH 2.0 a 8.0), presión osmótica (hasta 50 % de glucosa y fructosa), temperatura (de 37 a 43 °C) y tolerancia a la acumulación de metabolitos (12-15 % etanol, 2% de ácidos láctico y acético) que ocurren durante la fermentación de café. Se ha demostrado que

la alteración microbiana ante los cambios de temperatura tiene un efecto significativo en su actividad metabólica y crecimiento, ya que se favorecen aquellos microorganismos dentro del rango de 20-43 °C, especialmente 35-37 °C, los cuales también son capaces de aportar mejores características sensoriales (Gomes et al., 2022).

Para desarrollar cultivos iniciadores eficaces, es necesario realizar estudios sobre la microbiota en las fermentaciones del café, preferiblemente mediante técnicas de biología molecular (Huch & Franz, 2014). Un estudio detallado de los tipos y roles de los microorganismos asociados con la fermentación proporcionará información sobre las bacterias y levaduras que predominan en las distintas etapas de la fermentación y permitirá la selección de cepas iniciadoras funcionales apropiadas. Se sabe que las bacterias producen ácidos orgánicos (láctico y acético, primordialmente) que influyen en el perfil de acidez y participan activamente en la degradación de los polisacáridos del mucílago y de otros componentes del grano para generar metabolitos como alcoholes, aldehídos y cetonas que aportan complejidad al aroma y sabor del café en taza; de manera análoga, las levaduras pueden contribuir al desarrollo de perfiles sensoriales específicos, incluyendo notas frutales, especiadas y florales; además, pueden ayudar a reducir el riesgo de ocurrencia de fermentaciones no deseadas; por ejemplo, dado que el café es un buen sustrato para la producción de ocratoxina A (OTA) por especies de *Aspergillus* o *Penicillium* en ocasiones se emplean levaduras selectas que son capaces de inhibir el crecimiento de hongos filamentosos micotoxigénicos (Haile & Kang, 2019).

El uso de cultivos iniciadores puede promover bebidas con un sabor distintivo y buena calidad sensorial, pero no siempre resulta en un aumento del puntaje final de la bebida según el protocolo SCA. De acuerdo con Ferreira et al. (2023), un estudio en donde usaron el proceso en seco con inoculación obtuvo sabores de caramelo y frutas, los cuales no se identificaron en el proceso sin inoculación. Es importante mencionar que la calidad final que se observa en los cafés inoculados también depende de la variedad de la planta.

Los reportes sobre el uso de cultivos iniciadores en distintas etapas del proceso de fabricación de café han aumentado de manera considerable en tiempos recientes. Ferreira et al., (2023) realizaron la inoculación de soluciones de levadura sobre cerezas de café despulpadas y naturales colocas en baldes abiertos durante 16 h y después de eso, los granos fermentados se llevaron a una plataforma de secado, denominando a este procedimiento *inoculación en balde*, observando que el método favorecía la permanencia de bacterias y levaduras durante el proceso del café, especialmente en el tratamiento inoculado con *Saccharomyces. cerevisiae*. El café natural inoculado con *S. cerevisiae* CCMA 0543 presentó una diferencia significativa en el análisis sensorial, indicando el mejor resultado cuando se inoculó con el método del balde donde

se obtuvo un sabor frutal característico y aumentó 4 puntos en la escala SCA en comparación con el café sin inoculación. Por otro lado, los resultados sensoriales del café despulpado no mostraron diferencias significativas entre tratamientos (tipos de levadura) y métodos de inoculación. La fermentación puede también realizarse en biorreactores abiertos para la fermentación natural y despulpado durante 40 y 27 h, respectivamente, además el uso de estos recipientes mejora la higiene durante la fermentación del café pudiendo beneficiar el desarrollo del inóculo y promoviendo una diversificación más evidente de los atributos sensoriales. La principal ventaja de este método es su bajo costo de implementación, sin embargo, la dificultad de control durante el proceso representa la mayor desventaja debido a que es un proceso de secado lento, que puede causar problemas para controlarlo, especialmente a lo largo de un proceso de fermentación simultánea. Puede ser difícil mantener la producción a gran escala de un café de especialidad utilizando este método debido a la alta posibilidad de contaminación en el periodo inicial (Ferreira et al., 2023). La aplicación de prefermentación mediante cultivo iniciador puede favorecer la calidad sanitaria del café y permitir el desarrollo de diferentes notas sensoriales en la bebida; se ha encontrado que para suplir la baja calidad sensorial (notas poco pronunciadas en dulzor y acidez) específicamente en café robusta (*C. canephora)* varios estudios están centrándose en mejorar su calidad a través del control de los procesos fermentativos de producción de cafés de especialidad, debido a la posibilidad del desarrollo de precursores del aroma y sabor que suman a la calidad de la bebida. Así, la posibilidad de diversificación de rutas metabólicas promovidas por la fermentación constituye una oportunidad para que el café robusta pueda incorporarse al mercado de los cafés de especialidad (Gomes et al., 2022).

En esta tendencia las fermentaciones controladas pueden emplearse para darle un mayor valor al café, un ejemplo de esto es la aplicación de la maceración carbónica, que es un proceso heredado de técnicas de vinificación que explora la adaptabilidad de frutas intactas a un medio cerrado, sin O_2 y enriquecido con CO_2. Esta adaptación resulta en la transición de un metabolismo aeróbico respiratorio a uno fermentativo anaeróbico dentro de cada fruto, afectando la evolución de la microbiota de la fruta en el proceso de fermentación. Brioschi Junior et al. (2021) enfatizan que el cambio en el metabolismo fermentativo ocurre en el curso de la fermentación y que, debido a la exposición de CO_2, la acción de los microorganismos necesita estudiarse para entender cómo el perfil sensorial y químico puede sufrir cambios como resultado. La maceración carbónica o semi carbónica (fermentación en estado sólido) puede realizarse con o sin inoculación, pero el uso de inóculo puede acelerar la degradación del mucílago, ayudando a disminuir la pegajosidad y aumentar los azúcares simples, agregando más dulzor al café. El control de temperatura es muy importante ya que proporciona las condiciones ideales para que

los microorganismos actúen en la fermentación; a temperaturas más altas es posible reducir el tiempo de fermentación (aproximadamente 48 h), mientras que, en una fermentación a baja temperatura, es necesario prolongar la fermentación hasta 8 días.

Para la fermentación por maceración carbónica, se deben seleccionar cuidadosamente los frutos en óptimas condiciones, desechando aquellos secos, dañados, así como hojas, palitos y otras impurezas. Estos elementos se eliminan durante el lavado con agua potable. Posteriormente, se pesa una masa específica de café y se coloca en bolsas plásticas estériles, preferentemente de polipropileno liso. Empleando una envasadora al vacío, se extrae el aire atmosférico y se reemplaza con dióxido de carbono (CO_2) con una pureza del 99.9 % a una presión previamente establecida. Durante el proceso, se monitorean tanto la temperatura como el tiempo de fermentación; en la ***Figura 5*** se muestra un esquema del procedimiento.

Al finalizar cada fermentación, se revisa la integridad física de las bolsas plásticas para asegurar que no haya ocurrido contaminación por ingreso de aire. Finalmente, las bolsas se trasladan a la unidad de secado, la cual ha sido previamente higienizada. Brioschi Junior et al. (2021) utilizaron *Coffea arabica* variedad *Catuaí Vermelho* para evaluar los efectos de la maceración carbónica. Colocaron frutos maduros en bolsas plásticas estériles de polipropileno liso, evaluando temperaturas de 18, 28 y 38 °C, y tiempos de fermentación de 24, 48, 72, 96 y 120 h. El aire atmosférico fue retirado durante 20 s, y posteriormente se inyectó dióxido de carbono (CO_2) al 99.9 %, a una presión de 20 $kgf \cdot cm^{-2}$. Las incubadoras se programaron a −10 °C y 60 °C con circulación forzada de aire mediante ventilación interna. Siguiendo esta misma metodología, Gomes et al. (2022) analizaron el perfil sensorial y las funciones orgánicas que contribuyen a las cualidades sensoriales y nutricionales de la bebida elaborada a partir de *Coffea canephora* var. *conilon*.

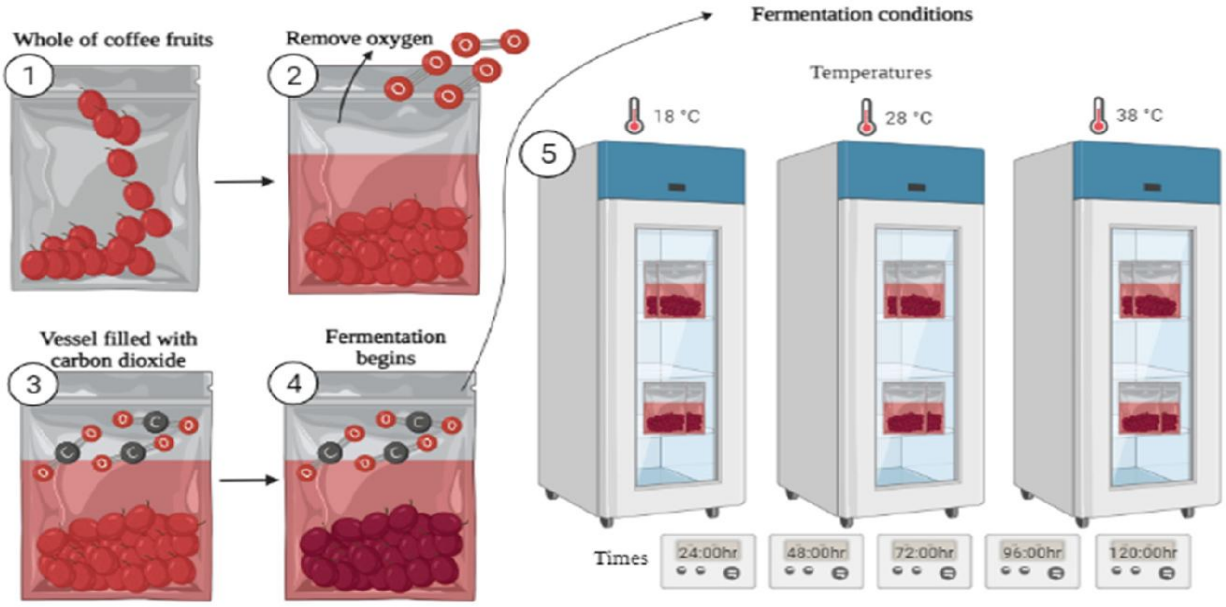


***Figura 5**. Proceso de fermentación carbónica*

Fuente: Gomes et al., 2022

Brioschi Junior et al. (2021) mostraron una mejora en las características sensoriales del café conforme se aumentó la temperatura y el tiempo de fermentación. Bajo condiciones de 38 °C, 120 h, se obtuvo un café con puntaje de 85.15, lo cual, de acuerdo con los estándares de SCA, clasifica al producto en la categoría *Excelente* (85–89.9 puntos). Se identificaron compuestos orgánicos como la trigonelina, el ácido fórmico, el hidroximetilfurfural (HMF), los lípidos y la γ-butirolactona como factores determinantes en la calidad sensorial de la bebida. Por su parte, Gomes et al. (2022) encontraron que la muestra fermentada a 38 °C durante 120 h obtuvo la puntuación más alta (83.25), seguida de otras muestras fermentadas a la misma temperatura por 72 h (82.16) y 96 h (81.85). Estos resultados sugieren una mejora del perfil sensorial en cafés sometidos a fermentaciones de al menos 72 h a una temperatura constante de 38 °C.

El análisis de componentes principales reveló que todas las variables sensoriales evaluadas se destacaron, lo cual refuerza la idea de que la calidad del café depende del equilibrio de los atributos sensoriales. Estos atributos pueden verse directamente influenciados por una amplia gama de compuestos químicos que interactúan durante la etapa de tostado de los granos, contribuyendo a una bebida con características sensoriales más equilibradas (Gomes et al., 2022).

Algunos estudios indican que, aunque *C. canephora* tiene niveles más altos de ácido clorogénico, su concentración puede verse alterada a través de procesos fermentativos y puede

verse influenciada por el tiempo, la temperatura y el microorganismo involucrado en el proceso, en otros estudios se reporta que, sobre el tiempo de fermentación, se observa que los contenidos de cafeína y ácido clorogénico en *C. canephora* disminuyen significativamente con el paso del tiempo, independientemente del microorganismo inoculado.

Para el café, aunque se ha observado un efecto benéfico de la maceración carbónica al promover cambios en el perfil químico y sensorial de *C. arabica,* aún no se ha llevado a cabo una selección de parámetros adecuados para *C. canephora* (Gomes et al., 2022). La ventaja de este método es que proporciona un ambiente con más asepsia y la posibilidad de reproducir las condiciones ambientales de la anaerobiosis, inhibiendo el crecimiento de microorganismos aerobios patógenos; por otro lado, la desventaja es que es un método que requiere biorreactores con control de presión y CO_2. Dado que este proceso requiere una mayor inversión para su aplicación, este método debe estudiarse mejor, ya que puede ser una forma prometedora de producir cafés de especialidad (Ferreira et al, 2023).

La fermentación anaeróbica autoinducida es una nueva tecnología para fermentar café con biorreactores de pequeñas dimensiones de polietileno cilíndricos cerrados (oscilan entre 20 y 200 L), que se basa en la fermentación del café en un ambiente cerrado sin adición de agua, en estado sólido (Ferreira et al., 2023). El proceso tiene una etapa aeróbica y otra anaeróbica. La condición anaerobia se alcanza lentamente debido al metabolismo de los microorganismos que consumen O_2 y producen CO_2. Con biorreactores, el ambiente anaerobio se logra con una válvula de esclusa de aire, que permite la salida del CO_2 producido en el interior del reactor sin permitir la entrada de O_2 (Ferreira et al., 2023). La producción progresiva de CO_2 impulsado por las actividades metabólicas microbianas favorecen el crecimiento de levaduras endógenas y BAL aumentando el nivel del metabolismo microbiano (metabolitos) en comparación con el proceso de fermentación tradicional (Elhalis et al., 2023) y la calidad sensorial de la bebida (Ferreira et al., 2023). Este es un método que se puede emplear con cerezas de café naturales o despulpadas y normalmente la homogeneización y alimentación del biorreactor se realiza de forma manual. El SIAF tiene un impacto positivo en el comportamiento microbiano, lo que da como resultado cafés con un atributo afrutado más intenso (Ferreira et al., 2023); un estudio comparativo entre un café producido por SIAF y uno tradicional, arrojó una gran diversidad de microbiota inicial que, bajo las condiciones del reactor, aumentó selectivamente las poblaciones de levaduras y bacterias ácido-lácticas, con el café de fermentación anaeróbica autoinducida los investigadores encontraron que había notas afrutadas, azúcar caramelizada, chocolate y herbáceas, mientras que el tradicional presentó notas más bajas (Elhalis et al., 2023). Dichos cambios están correlacionados con el entorno anaerobio que se produjo en el biorreactor

modificando los compuestos químicos del grano, produciendo metabolitos como el ácido láctico, el ácido clorogénico, la trigonelina y la sacarosa, en comparación con el proceso de fermentación tradicional, razón por la cual alcanzan un atributo afrutado más intenso (Elhalis et al., 2023; Ferreira et al., 2023). Para los volátiles, el proceso de fermentación anaeróbica autoinducida contenía niveles más altos de lactonas, ácidos, pirazinas, fenoles y piridinas en comparación con los métodos convencionales. Estos cambios químicos se correlacionan con notas sensoriales favorables con puntuaciones más altas de acidez, dulzura, cuerpo y retrogusto.

El uso de biorreactores cerrados asegura el mejor rendimiento de los cultivos iniciadores de la levadura. Sin embargo, el tratamiento del café (natural o despulpado), la región (altitud y temperatura) y la cepa de los microorganismos utilizados como cultivos iniciadores influyen en los resultados que pueden obtenerse con fermentación anaeróbica autoinducida.

En otros estudios, se ha explorado la combinación de tecnologías como el uso de biorreactores y cultivos iniciadores para optimizar el proceso de fermentación del café. En este contexto, Bressani et al. (2021) inocularon levaduras en biorreactores cerrados de polipropileno, tanto de forma individual como en combinaciones selectivas. Las cepas utilizadas fueron *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida parapsilosis* y *Torulaspora delbrueckii*, y sus efectos fueron comparados con fermentaciones espontáneas. Los resultados mostraron que las co-inoculaciones de *C. parapsilosis* y *T. delbrueckii* produjeron cafés con los puntajes sensoriales más altos, mientras que otros tratamientos con levaduras individuales resultaron en puntuaciones inferiores respecto al café fermentado de forma espontánea. Por otro lado, Elhalis et al., (2023) reportaron que, al inocular levaduras en biorreactores de polietileno, *S. cerevisiae* y *T. delbrueckii* mostraron el mejor rendimiento en los métodos de fermentación con pulpa y secado natural, respectivamente. Asimismo, bacterias ácido-lácticas (BAL), como *Leuconostoc mesenteroides* y *Lactiplantibacillus plantarum*, fueron inoculadas individualmente y en co-cultivo con las levaduras *S. cerevisiae* y *T. delbrueckii*. Los resultados indicaron posibles modificaciones e intensificaciones en ciertas notas sensoriales, siendo el co-cultivo de *L. plantarum* con *S. cerevisiae* el que alcanzó la puntuación sensorial más alta (Elhalis et al., 2023).

Dependiendo del tratamiento del café y la cepa utilizada como cultivo iniciador, se puede lograr un aumento de más de 5 puntos en la escala SCA (80-84.9 Muy bueno, 85-89.9 Excelente, 90-100 Exquisito). La principal ventaja de este método es que permite un ambiente de anaerobiosis de bajo costo, haciéndolo asequible para los pequeños productores; sin embargo, las desventajas se relacionan principalmente con la ausencia de herramientas de control de procesos, especialmente con respecto al uso de tambores de polipropileno (Ferreira et al., 2023); en estos casos, normalmente no hay sensores de pH o temperatura, ni ningún dispositivo que

promueva la agitación del café. Por lo tanto, esto podría aportar más claridad sobre la variación de oxígeno dentro del reactor y cómo podría verse afectado el metabolismo de los microorganismos.

2.4 Alta presión hidrostática

2.4.1 Definición y principios de acción.

Las tecnologías de procesamiento no térmico se describen como aquellas donde la fuente alternativa de energía (alta presión, campos eléctricos, irradiación) es usada como el agente letal para inactivar microorganismos patógenos o deteriorantes; las ventajas sobre el alimento es que mantienen sus nutrientes y mantienen la calidad sensorial. La tecnología de procesamiento por alta presión (HPP) surgió como una alternativa a los procesos térmicos con el fin de obtener alimentos microbiológicamente seguros; los tratamientos comerciales se aplican en un rango de 400-700 MPa y a una temperatura de 4°C-50°C; el alimento que será tratado debe ser empacado al vacío en un empaque polimérico flexible (que permita la transmisión de la presión al alimento) y posteriormente se coloca dentro de una canasta cilíndrica que a su vez se introduce en un recipiente a presión el cual se llena con un fluido que generalmente es agua, la presión deseada se alcanza mediante la compresión del fluido transmisor de presión utilizando la acción combinada de una bomba y un intensificador; en este punto se aplica el término termodinámico de transmisión isostática, el cual menciona que la transferencia de presión es uniforme en todas direcciones independientemente de la forma geométrica y tamaño del alimento y que no depende de la masa o el tiempo del proceso; por lo tanto los alimentos no se deforman pero el volumen puede llegar a reducirse en un 19%. Durante la compresión adiabática del alimento, la temperatura incremente cerca de 3°C por 100 MPa dependiendo del valor de compresibilidad del alimento, medio transmisor de presión utilizado y la temperatura del medio; la aplicación casi instantánea y uniforme de presión facilita el escalado desde el laboratorio hasta la escala industrial; lo alimentos más apropiados para la aplicación de esta tecnología son aquellos altos en humedad, de forma contraria aquellos que sean sólidos y secos o con mucho aire ocluido no son buenos candidatos (Escobedo-Avellaneda et al., 2011; Koutchma, 2014).

El segundo principio termodinámico aplicado es el principio de Le Chatelier-Braun, según el cual en condiciones de equilibrio las reacciones químicas, transiciones de fase o cambios conformacionales que impliquen una reducción de volumen se verán favorecidas por la presión, mientras que en el caso contrario, el cambio será inhibido, ya que hay una reducción del espacio molecular disponible lo cual restringe los movimientos rotacionales, vibracionales y transicionales de las moléculas, por lo que aumentan su ordenamiento. Sin embargo en la

industria alimentaria, la velocidad de la reacción química suele ser más importante que el punto de equilibrio porque los tiempos de proceso son demasiado cortos para alcanzar este último. Una aplicación correcta del principio de Le Chatelier-Braun es la predicción del cambio temporal del pH inducido por la presión, aunque el pH vuelve a su valor original cuando se reduce la presión, el cambio de pH inducido por la presión podría tener un efecto sobre las reacciones químicas y sobre la inactivación de enzimas y microorganismos cuando los alimentos están sometidos a una alta presión. (Rios-Corripio et al., 2020; Silva & Evelyn, 2023)

2.4.2 Tipo y parámetros de proceso de alta presión hidrostática (PAPH)

Este proceso se aplica como técnica de conservación por su capacidad de inactivación o reducción de carga microbiana ya que utiliza presiones de entre 100 – 800 MPa; el equipo de lote consta de una cámara de presurización (cilíndrico de acero), un generador de presión (una bomba hidráulica) y un sistema de control de temperatura, por lo general estos equipos tienen un funcionamiento discontinuo, los alimentos (sólidos o líquidos) pre envasados en un material flexible se cargan dentro de la cámara de presurización, el sistema de bombeo irá sustituyendo el aire de la cámara por el fluido de presurización (generalmente agua) hasta su total llenado. Alcanzar la presurización toma un tiempo de 30 s 0 de 1-2 min dependiendo de la presión prestablecida o de la composición del alimento o bebida; por ejemplo un vino tinto toma menos de 2 min para alcanzar una presión de 600 MPa; una vez que se alcanza la presión que se requiere para el tratamiento, una válvula que cierra el circuito se encarga de mantener dicha presión durante el tiempo programado. Existe un incremento pequeño de temperatura (2-3°C/ 100 MPa para bebidas y alimentos con alto contenido de humedad; y de 5-9°C/10 MPa para alimentos con alto contenido de grasa) en este tipo de tratamiento es inevitable debido al calentamiento adiabático con el trabajo de compresión. Los principales equipos PAPH son unidades por lotes; su funcionamiento discontinuo puede representar una desventaja pues lica que, al finalizar cada ciclo, se requiere un periodo adicional para descargar el alimento procesado y cargar un nuevo lote, lo que reduce la eficiencia operativa del sistema (Balasubramaniam et al., 2016; Koutchma, 2014; Ngadi et al., 2011).

2.4.3 Efectos del PAPH sobre microbiota de alimentos

En los procesos de conservación de alimentos, se utilizan presiones elevadas, comúnmente en el rango de 600 MPa, con el objetivo de acelerar la inactivación microbiana. Actualmente, esta tecnología se aplica con diversos fines: inactivar microorganismos patógenos para garantizar la inocuidad alimentaria; extender la vida útil de productos seleccionados —como

carnes de ave, frutas, vegetales, jugos, productos lácteos, pescados y mariscos— mediante la reducción de su carga microbiana; y como herramienta de procesamiento para mejorar la funcionalidad de las proteínas, acelerar fenómenos de transporte y aumentar la concentración de compuestos bioactivos, entre otros. Durante la aplicación de PAPH, los microorganismos presentes en alimentos son inactivados a presiones de 400-600 MPa sin necesidad de aplicar un tratamiento térmico; esto se atribuye a la inactivación enzimática y a la ruptura de la membrana celular, aunque también puede estar relacionado con los cambios en el pH a nivel intracelular que a su vez se relaciona con la inactivación de las enzimas responsables del control de la acidez y el daño a la membrana. La inactivación microbiana se relaciona con la desnaturalización proteica, alteración de membranas celulares por pérdida de solutos y a formación de poros en la membrana celular con la consiguiente formación de poros y la resultante hinchazón o contracción celular; la efectividad de la inactivación va a depender del tipo de microorganismo, género, especie, cepa, fase de crecimiento y composición del alimento, se ha demostrado que las células eucariotas (mohos y levaduras) son más susceptibles que las procariotas (bacterias) (Caballero-Figueroa et al., 2022a; Silva & Evelyn, 2023).

Las principales aplicaciones de esta tecnología se concentran en productos como jugos y bebidas, alimentos infantiles y purés de frutas, guacamole y derivados del aguacate, comidas preparadas, productos cárnicos, lácteos, mariscos, alimentos para mascotas, salsas, productos vegetales y frutales, así como en los sectores farmacéutico y cosmético (Hiperbaric, 2024). En la ***Tabla 3*** se presentan datos selectos de inactivación microbiana en distintos alimentos tratados mediante PAPH. Algunas cepas de *Escherichia coli*, *Salmonella* enterica y *Staphylococcus aureus* han mostrado resistencia a los tratamientos de PAPH, esto puede deberse a que las células que están en fase estacionaria son más resistentes a cambios físicos que aquellas que se encuentran en fase logarítmica, lo cual puede explicarse debido a que en esta última el microorganismo se encuentra en la etapa de división celular y la membrana es más sensible al estrés ambiental; se han reportado distintos grados de letalidad de *S. aureus* que van desde 2.5 a 6 ciclos log en leche, queso y carne con tratamientos de 400-600 MPa; por su parte, para *E. coli* se han obtenido hasta 7 reducciones log en jugos de manzana, naranja y jitomate a 500 MPa por 5 min y en carne mediante PAPAH a 500 MPa/15 min (Bello et al., 2014), en la ***Tabla 3*** se muestran datos de reducciones logarítmicas en diferentes alimentos tratados por PAPH.

2.4.4 Efectos de modulación de PAPH

En años recientes se han buscado nuevas aplicaciones de esta tecnología que no tienen que ver directamente sobre la inactivación enzimática o microbiana o con el incremento de

metabolitos secundarios; en el campo de los vinos es sabido que el producto final puede sufrir alteraciones de deterioro microbiano debido a algunas levaduras presentes como *Brettanomyces bruxellensis* y bacterias como *Lactobacillus plantarum*, *Acetobacter aceti* y *Acetobacter pasteurianu* que son propias de la flora nativa del vino; hasta el momento solo se utiliza sulfito como conservador. En un estudio realizado por Van Wyk & Silva (2017), se utilizó una presión de 200 MPa por 180 s para modular el crecimiento de *B. bruxellensis* en vino (Dolcetto Syrah), y encontraron reducciones logarítmicas entre 1.1 y 5.1; además otro estudio realizado por Tao et al. (2012) sobre vino tinto siciliano (Nero D'Avola-Syrah) no reveló diferencias significativas en las intensidades de las características sensoriales de las muestras de vino sin procesar y procesadas a alta presión (650 MPa/15 min). Además de preservar las características sensoriales la aplicación de esta tecnología abre el camino para seguir investigando la modulación de la microbiota de diferentes productos.

Tabla 3. Reducciones logarítmicas en diferentes alimentos tratados por PAPH

Alimento	Microorganismo	Condiciones de PAPH	Resultados de inactivación
Jugo de zanahoria	*B. licheniformis*	400–600 MPa 0–40 min 40–60 °C	241-465 MPa (Valor D= 23.3-31 °C)
Pollo cocido	*C. botulinum*	600 MPa, 2 min 20 °C	600 MPa, 2 min at 20 °C, reducción de 2 log
Jugo de naranja	*A. acidoterrestris*	200–600 MPa 1–15 min 45–65 °C	600 MPa, D_{55} = 7 min; 200 MPa, D_{65} = 5.0 min
Leche	*B.sporothermodurans*	300–500 MPa 10–30 min 30–50 °C	495 MPa /30 min, 49 °C, -2 ciclos log
Granada	Mesófilos aerobios	350, 450 y 550 MPa a 30, 60 y 90 s	-4 ciclos log
Carne de pollo	*Staphylococcus aureus*	600 MPa 50°C/15 min	-4 ciclos log
Leche ovina	*Staphylococcus aureus* subsp. *aureus* Rosenbach 1884	500 MPa/ 7 min	-3.2 ciclos log

Fuente: (Bello et al., 2014; Houška et al., 2022; Silva & Evelyn, 2023)

2.5.4 Efectos sobre frutas y vegetales

Actualmente, los consumidores están cada vez más atentos a las características nutricionales, saludables y de inocuidad de los alimentos que consumen, especialmente a que

estos mantengan sus propiedades originales tras el procesamiento. En este contexto, el PAPH se ha consolidado como una de las tecnologías de esterilización en frío más exitosas, pues permite obtener productos con una mejor retención de color, aroma, sabor y nutrientes, además de ser eficiente y respetuosa con el medio ambiente.

Es fundamental considerar la influencia del PAPH sobre la matriz alimentaria, ya que puede afectar componentes como proteínas, enzimas, compuestos bioactivos, textura, color y sabor. Sin embargo, dado que esta tecnología no rompe enlaces covalentes, los cambios fisicoquímicos suelen ser mínimos. Esto permite preservar compuestos funcionales, aromáticos y vitaminas, manteniendo así la calidad sensorial y nutricional del producto. Los cambios que sí se han documentado afectan principalmente propiedades físicas como el punto de fusión, la solubilidad, la densidad y la viscosidad; también pueden influir en procesos de equilibrio, como la disociación de ácidos débiles, equilibrios ácido-base o ionización, así como en la velocidad de ciertas reacciones químicas (Wang et al., 2024; Caballero-Figueroa et al., 2022).

2.4.4.1 Efecto sobre pH y acidez titulable

En cualquier tipo de alimento el crecimiento microbiano se ve afectado por parámetros como el pH y la acidez titulable, por lo tanto se pone principal atención en cómo controlarlos para evitar el deterioro; las mediciones de pH a jugos tratados con PAPH no han reportado cambios significativos sobre el pH, debido a que esta tecnología no destruye los enlaces covalentes existentes; aunque dependiendo de la naturaleza de las matrices de jugo la presión tiende a iniciar la ionización de moléculas pequeñas como agua y ácidos débiles liberando iones de hidrógeno y aumentando el pH. Algunos autores han reportado cambios insignificantes en el pH y los sólidos solubles totales del puré de kiwi tratado con 500 MPa/25°C/ 3 min, en puré de caqui (400 MPa/25°C/1 min) y en jugo de uva (300 MPa/3 min/20°C) (Ravichandran et al., 2023).

2.4.4.2 Efecto sobre color

Pigmentos responsables de dar coloración a frutas y vegetales como la clorofila, carotenoides y antocianinas no se ven significativamente afectados una vez que se ha aplicado el PAPH pero durante el almacenamiento pueden llevarse a cabo cambios debido a la inactivación parcial de enzimas o de microorganismos. Los carotenoides son compuestos estables a la presión y se ha encontrado que al ser expuestos a PAPH se incrementa su extracción, en el caso de las antocianinas estos son pigmentos vacuolares hidrosolubles responsables del color rojo a azul en frutas y verduras; que al igual que los carotenoides se mantienen estables durante el tratamiento de PAPH a temperatura moderada, pero después del almacenamiento de una semana de grosellas negras que fueron tratadas a 200,400,600 y 800

MPa/15 min se observó que la cianidina-3-rutinósido y delfinidina-3 rutinósido tenían diferentes estabilidades; una de las hipótesis del mecanismo de degradación de las antocianinas es que esta es causada por una inactivación enzimática incompleta, como ejemplo se puede mencionar que la inactivación de la polifenoloxidasa se relacionó con la estabilidad del glucósido de pelargonidina-3 y del rutinósido de pelonidina-3 en frambuesas y fresas rojas presurizadas (800 MPa/18-22 °C/15 min), debido a que el tratamiento a 800 MPa (18-22 C/15 min) provocó una inactivación completa de la polifenol oxidasa, la estabilidad de estas dos pelargonidinas logró mantenerse durante el almacenamiento; otra hipótesis es que el ácido ascórbico tiende a acelerar la degradación de las antocianinas. Es importante relacionar también que los cambios texturales que se presenten en el alimento como resultado de la aplicación de PAPH pueden jugar un rol importante en la traslucidez/opacidad ya que se podrán observar cambios en la naturaleza y extensión de la luz dispersada internamente y en la reflectancia de la superficie lo que indicará cambios de color post tratamiento, estos pueden variar de acuerdo con la presión y tiempo de tratamiento así como el tiempo durante el cual los productos se encuentren almacenado, por ejemplo el jugo de tomate tratado a 700 MPa/45°C/10 min almacenado durante 52 semanas a 4, 24 y 37°C presentó cambios mínimos en el color (Oey et al., 2008; Ravichandran et al., 2023).

2.4.4.3 Efecto sobre textura

Los cambios de textura en frutas y vegetales están asociados a las modificaciones de los polímeros de la pared celular a causa de procesos enzimáticos y no enzimáticos; derivado de la aplicación del tratamiento de alta presión, se liberan sustratos iones y enzimas lo que permite la interacción entre los mismo y por lo tanto algunas reacciones enzimáticas pueden llevarse a cabo, aunque al mismo tiempo está comprobado que para algunas matrices alimentarias la aplicación de PAPH puede mejorar la acción de la pectinmetilesterasa (PME) y reducir la actividad de la poligalacturonasa (PG) que ocurre a temperatura moderada, por ejemplo la PME de naranja, fresa, jitomate, plátano y pimienta han mostrado diferencias en su estabilidad frente a la presión y temperatura aplicadas, esto replantea el uso de diferentes combinaciones de estos parámetros para activar o inactivar algunas pectinasas específicas para crear texturas que no pueden obtenerse después de solo aplicar un tratamiento térmico. Después de la presurización, la primera pérdida de firmeza es el ablandamiento, la cual se asocia a la ruptura de la membrana y a la pérdida de turgencia debido a los cambios en la permeabilidad que provocan la liberación del contenido celular y con esto el movimiento del agua y los metabolitos, los cambios dependerán del tipo de célula, se puede citar el caso de la espinaca y coliflor tratada a 400 MPa/30 min/ 5°C donde se pudo observar por medio de microscopía la alteración de la integridad

celular, para el caso de la hoja de espinaca en esta se desintegró el espacio intracelular y se llenó con gas y en la coliflor se observó la formación de cavidades dando una textura más firme con apariencia empapada (Dhenge et al., 2023; Nath et al., 2023; Oey et al., 2008).

2.4.4.4 Efecto sobre sabor

El sabor es la impresión sensorial de un alimento la cual está determinada por los sentidos químicos del gusto y el olfato, los sabores se identifican una vez que el alimento entra en contacto con la saliva y los olores son compuestos volátiles que se reconocen directamente vía ortonasal. Generalmente se asume que el tratamiento de PAPH no altera el sabor fresco de frutas y vegetales debido a que la estructura de las moléculas de sabor no se ven afectadas directamente por la presión, pero es importante tomar en cuenta que las reacciones enzimáticas y químicas si pueden alterar indirectamente el contenido de algunos compuestos de sabor que pudieran resultar indeseables; esto dependerá del producto y del tratamiento de presión aplicado. Por ejemplo, algunos estudios de cromatografía de gases mostraron cambios en el contenido de hexanal (compuesto asociado al olor a pasto) en frutas y vegetales tratos con PAPH, por ejemplo en puré de fresa el contenido de este compuesto aumentó a más del doble después de haber sido tratado a 400 MPa/20 min y de forma contraria se observó una disminución de hexanal en el mismo producto pero tratado a 800 MPa/20 min; en cebollas tratadas a 30 MPA/30 min se aumentó la concentración de hexanal en un 40% acompañado de la generación de un olor a estofado o frito asociado al contenido de disulfuro de propilo trans-propenilo. Con base en evaluaciones sensoriales, el sabor de jugo de naranja tratado a 500 MPa/90 s, 700 MPa/60 s y 800 MPa/5 min no fue tan fresco como el jugo control, pero sí reportó un mejor sabor en comparación con el jugo pasteurizado ya que no se detectó el típico *off flavor* de jugo de naranja calentado; por otro parte, para jugo de zanahoria el aroma fue más intenso cuando se trató a 800 MPa/5min. El tratamiento de PAPH ha resultado un método de conservación de frutas y vegetales aunque no siempre se pueden mantener por completo las propiedades sensoriales del producto fresco, pero sí mejores que aquellos que reciben tratamientos tradicionales de conservación; esto pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo análisis químicos que pueden correlacionarse con la parte sensorial para comprender mejor los efectos del tratamiento de PAPH (Oey et al., 2008).

2.4.4.5 Efecto sobre proteínas

El efecto del tratamiento de PAPH afecta los enlaces no covalentes (iónico, hidrofóbico y puentes de hidrógeno) de las proteínas, lo que significa que las estructuras secundarias, terciarias y cuaternarias se desenvuelven y disocian como se muestra en la ***Figura 6*** (por encima

de los 500 MPa) dejando expuestos a los grupos sulfhidrilo o grupos tiol (-SH), mientras que la estructura primaria permanece estable (150-200 MPa); las modificaciones estructurales reversibles o no, conducen a una disminución de la solubilidad o agregación, la desnaturalización o fragmentación de las proteínas. Messens et al. (1997) reportan que es necesario aplicar una presión de 150 MPa para generar cambios en estructuras primarias y de más de 200 MPa para modificar significativamente estructuras secundarias y terciarias; se ha encontrado que proteínas aisladas de cacahuates son capaces de producir geles a 100 MPA/5min/25°C (Torres et al., 2014; Caballero-Figueroa et al., 2022; Ravichandran et al., 2023).

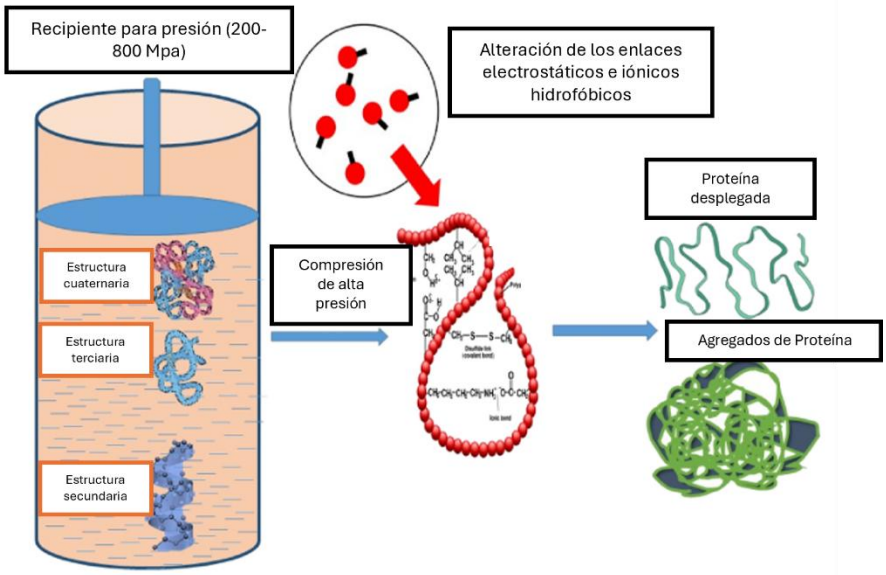


Figura 6. *Efectos del PAPH sobre la desnaturalización de proteínas*

Fuente: Hiperbaric (s.f.)

2.4.4.6 Efecto sobre enzimas

Las enzimas son biocatalizadores esenciales para las actividades metabólicas y fisiológicas de las plantas, estas sintetizan varias enzimas a lo largo de cada una de las etapas de su desarrollo e incluso pueden permanecer activas después de la cosecha. Las enzimas tienen dos regiones importantes, una se encarga de reconocer el sustrato y la otra de catalizar la reacción; si alguna reestructuración llega a suceder en la enzima se verá afectada su funcionalidad, se ha encontrado que dependiendo de la presión aplicada en el tratamiento de PAPH suceden dos reacciones diferentes; si al aplicar una presión de 100-500 MPa ocurre una activación en las proteínas monoméricas rompiendo enlaces cuaternarios y que resulta en la disociación de enzimas oligoméricas en subunidades individuales, pero cuando la presión excede los 500 MPa y además se combina con temperaturas altas las enzimas se inactivan,

produciendo la alteración de estructura terciaria de las enzimas que están estabilizadas por interacciones electrostáticas e hidrofóbicas, en este proceso se introduce agua en la molécula de proteína lo que lleva a la pérdida de contacto entre dominios no polares de la molécula que provoca un cambio conformacional, despliegue parcial y pérdida de actividad. Actualmente se siguen estudiando los parámetros adecuados de presión, temperatura, pH, entre otros; con la finalidad de inactivar o inhibir a las enzimas endógenas de productos vegetales y vegetales para disminuir cambios en color y textura.

III. Metodología

En la **Figura 7** se presenta el diagrama que resume las actividades llevadas a cabo durante la ejecución del presente proyecto.

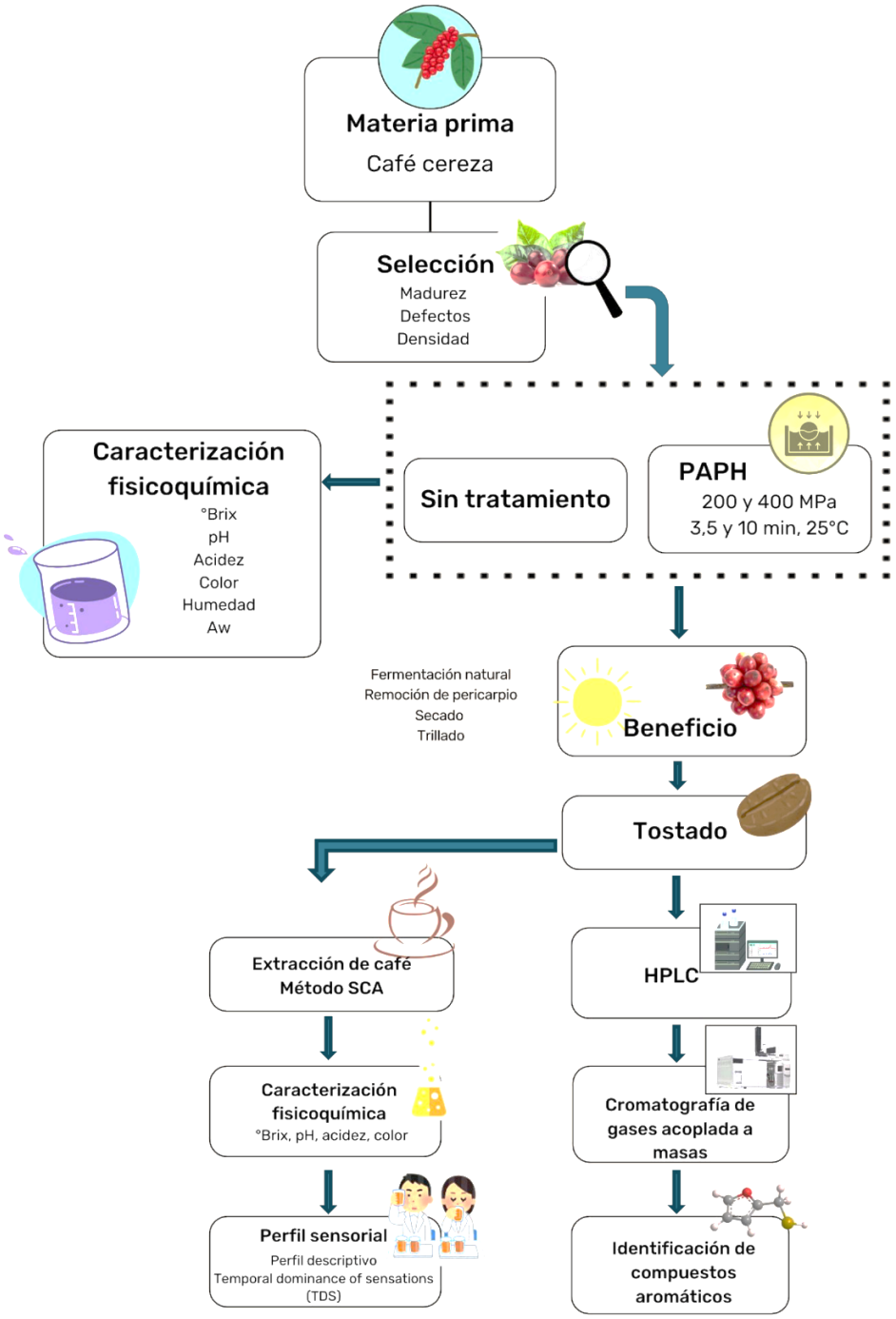


***Figura 7**. Diagrama de tratamiento de café cereza por alta presión, su beneficiado y análisis.*

3.1 Selección de materia prima.

Las muestras de café cereza (*Coffea arabica*) variedad Marsellesa se recolectaron en la Finca *El Encanto* en el municipio de Santa María Zihuateutla, perteneciente a la región económica de Huauchinango, Puebla, ubicado entre los paralelos 20° 12’ y 20° 23’ de latitud norte; los meridianos 97° 40’ y 97° 58’ de longitud oeste con una altitud entre 900 y 1 800 m sobre el nivel del mar (INEGI, Anuario Estadístico y Geográfico de Puebla, 2017). Se realizaron cinco muestreos en los meses de marzo a mayo del 2023, donde se recolectaron 15 kg de frutos maduros (18-20 °Brix). Las bayas fueron seleccionadas por su tamaño, de acuerdo con su retención en criba 15 (diámetro de 7.14 mm) y por su calidad mediante separación por densidad. Este proceso se realizó colocando las cerezas en una tina de 20 L de agua, retirando aquellas bayas que flotaran, lo cual indicaba que tenían una calidad no apta para su proceso posterior (inmaduras, sobremaduradas, secas, vanas, con daños mecánicos); en particular, las cerezas inmaduras son menos densas debido a una menor concentración de sólidos solubles o por presencia de granos no bien desarrollados; un resumen visual de la recolección y selección de las cerezas se muestra en la ***Figura 8***. El lote de cerezas se trasladó al laboratorio de Análisis de Alimentos de la Facultad de Ingeniería Química donde se dividió en 3 fracciones de 5 kg cada una, las cuales se lavaron con agua potable comercial y desinfectaron con hipoclorito de sodio al 0.02% durante 30 s (Cajiao et al., 2017). Las muestras se mantuvieron en refrigeración hasta ser procesadas.



Figura 8*. Recolección y pretratamiento de café cereza*

a) Café cereza en cafeto b) Corte de cerezas c) Selección por tamaño d) Selección por densidad e) extendido de cerezas para traslado f) desinfección de cerezas.

3.2 Tratamiento por alta presión hidrostática.

Las cerezas previamente desinfectadas se colocaron en bolsas de poliamida (PA) y polietileno (PE) libres de Bisfenol A (BPA) y de grado alimenticio. Las bolsas se llenaron aproximadamente a un tercio de su volumen con agua potable a una proporción de 3.2 a 1 (240

mL agua: 75 g cereza), para posteriormente empacarse al vacío (EVD-4, Torrey, México). El pretratamiento de PAPH se realizó en un equipo Avure AV-S (JBT, Chicago, EUA), localizado en el Centro de Investigación y Tecnología (México) de la empresa JBT Marel; se aplicaron tratamientos a dos niveles de presión (200 y 400 MPa) durante tres tiempos de proceso (3,5 y 10 min) buscando condiciones de tratamiento subletal, que no eliminaran por completo a la microbiota nativa. Las condiciones de subletalidad microbiana del PAPH con relación a los niveles de presión involucrados dependen del tipo de microorganismos presente en el alimento y de factores tanto intrínsecos (pH, composición) como extrínsecos (tiempo de proceso, temperatura, tipo de equipo) (Lee et al., 2023). Un resumen visual del proceso PAPH implementado se presenta en la ***Figura 9.***



Figura 9. *Tratamiento de alta presión hidrostática en cerezas*
a)Empacado de cerezas b) Colocación de muestras en canastas c) Colocación de canastas con muestras d) Equipo de alta presión AVURE AV-s e)Display del equipo durante su funcionamiento

3.3 Caracterización fisicoquímica.

Las siguientes pruebas fisicoquímicas se llevaron a cabo a la cereza con y sin tratamiento de alta presión hidrostática; todas las determinaciones se hicieron por cuadruplicado.

3.3.1 Colorimetría triestímulo.

La determinación del color se llevó a cabo utilizando un colorímetro ColorFlex (HunterLab, Reston, Virginia, USA) en la escala CIE L*a* b*, bajo condiciones estandarizadas de operación (iluminante D65 y ángulo de observación de 10°); donde también se obtuvieron directamente los parámetros de Chroma y Hue con el equipo, para el caso de las cerezas de café, café verde y café tostado se tomaron seis de ellas de forma aleatoria y se colocaron en una placa de cristal

(10 cm de diámetro, 1 cm de altura) y para las muestras de extracción de café se colocaron 25 mL de cada muestra por separado en la placa de cristal (García-García et al., 2019).

3.3.2 Contenido de humedad y actividad de agua

Para establecer el contenido de humedad de los frutos, se tomaron 3 g de cerezas de café trituradas en charolas a peso constante y se colocaron en un horno de convección TE-H80DM (Therlab, El Arenal, Jalisco, México) a 100° ± 2°C durante 4 h (NOM 116-SSA1-1994). Por su parte, la actividad de agua de las muestras se obtuvo empleando una cereza de café (2 g aproximadamente) la cual se colocó en un higrómetro de punto de rocío 4TE (AquaLab, Pullman WA, USA) (Osorio et al., 2022).

3.3.3 °Brix.

La determinación de sólidos solubles, expresada en grados Brix, se realizó conforme al método 931.12 de AOAC (2005). Se tomó una muestra de 1 g y se diluyó con 1 mL de agua destilada para medir los sólidos solubles totales utilizando un refractómetro digital PAL α1 (ATAGO, Bellevue, WA, USA).

3.3.4 pH y acidez

La determinación de pH se hizo de acuerdo con el método 981.12 (AOAC, 2005); las muestras fueron molidas en un mortero previo a la determinación de pH con un potenciómetro CD 510 (WPA, Cambridge, UK) (***Figura 10***). Por su parte, para la determinación de acidez, ésta se realizó de acuerdo con el método 942.15 de la AOAC (2005); el resultado de titulación se expresó como g de ácido cítrico/ 100 g de muestra.

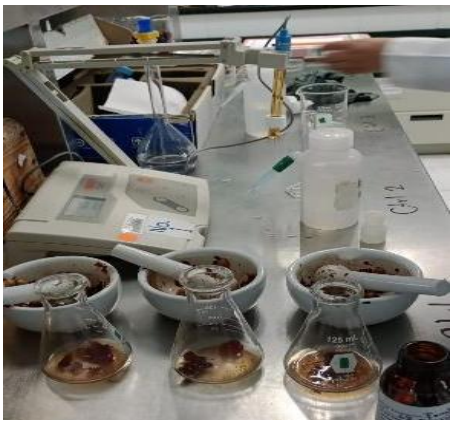


Figura 10. *Determinación de pH en muestras de café cereza.*

Fuente: Propia

3.4 Proceso de beneficiado

3.4.1 Fermentación/secado de cerezas.

Tras el PAPH, las cerezas fueron devueltas a la finca y procesadas por un beneficiado natural; este consistió en extenderlas en capas delgadas sobre camas africanas localizadas dentro de un invernadero (***Figura 11a,b***), removiéndolas manualmente varias veces al día para asegurar una aireación adecuada y un secado homogéneo, permitiendo su fermentación espontánea con microorganismos sobrevivientes del PAPH (***Figura 11 c***)**,** evitando el desarrollo de mohos. Las cerezas se pesaron cada 24 h en una báscula digital (PCR-40, Torrey®, CDMX, México), y se mantuvieron bajo estas condiciones hasta alcanzar un contenido de humedad residual del 12%. Se registró el tiempo de secado necesario para la obtención del café bola (grano de café en la cereza seca, aún con cáscara, remanentes de mucílago seco y pergamino).



Figura 11. *Proceso de beneficiado natural de la cereza de café*

a) Distribución en camas africanas b) Secado solar en invernadero c) Cerezas secas y fermentadas

3.4.2 Limpieza, trillado y tostado.

Tras alcanzar la humedad residual deseada, se eliminaron las capas externas secas recubriendo el grano. El pericarpio se retiró manualmente, mientras que el pergamino se eliminó utilizando una trilladora 100Mex (Coatepec, Veracruz) facilitada por la empresa Café Pajcha (Cholula, Puebla) (***Figura 12b,c***) para obtener el denominado café verde; los granos no conformes fueron separados manualmente, incluyendo caracolillos (una sola semilla en la cereza) y aquellos de tamaño reducido. El café verde fue tostado a 184–196 °C por 6–8 min en un equipo de la empresa Panela Canela (Cholula, Puebla) (T-31, Licona, CDMX, México) (***Figura 12 d,e***) hasta alcanzar un tueste claro, siguiendo el protocolo de la SCA, registrando la temperatura inicial y final del grano, peso inicial y final, primer *crack*, tiempo total y porcentaje de merma (Benítez Urbano & Campo Ceballos, 2018).

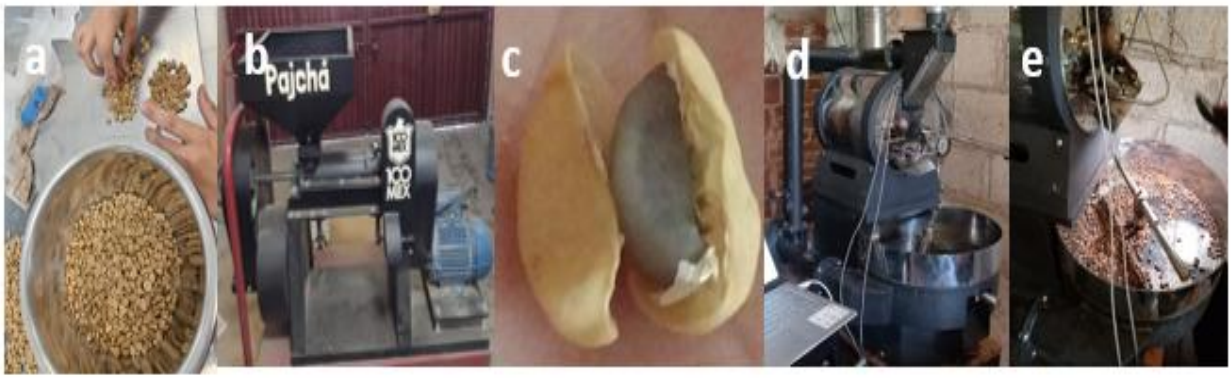


Figura 12. *Selección de café para trillado y tostado*

a) Selección de café verde pretrillado b)Trilladora de café c) Café trillado d)Tostadora de café e)Tostado de café

Fuente: Propia

3.5 Caracterización sensorial del café.

3.5.1 Calibración de jueces expertos.

Se trabajó con un panel entrenado de 6 personas pertenecientes al Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), en Guadalajara, Jalisco, México. La calibración del panel se llevó a cabo en cinco sesiones de entrenamiento, donde se utilizó el kit de La Nariz del Café ® (NEZ001, Cassis, Franc), la cual consta de 36 muestras con aromas típicos de café, para que los jueces aprendieran a identificar los descriptores asociados a las muestras analizadas; se utilizaron los siguientes 26 términos: tierra, paja, cedro, clavo, pimienta, grano de cilantro, vainilla, flor de cereza, cereza cafeto, albaricoque, mantequilla, cuero, pan tostado, malta, caramelo, chocolate amargo, almendra, cacahuate, avellana, nuez, olor ahumado, tabaco, café tostado, medicinal y caucho (***Tabla 5***). También se trabajó una escala de gustos básicos y aromáticos de acuerdo con Meilgaard et al. (2016). Un resumen visual del desarrollo de la calibración se muestra en la ***Figura 13***.

3.5.2 Perfil descriptivo.

Una vez que los jueces fueron calibrados se realizó una prueba de perfil descriptivo mediante la metodología Spectrum® para obtener los principales descriptores de las siete muestras de café tostado, así como las intensidades de cada uno, de ellos. Esta prueba fue diseñada con ayuda del software FIZZ® (Biosystems, 2023), utilizando una escala de 15 puntos, en las cuales se indicaron las anclas reportadas por Spectrum®; cada uno de los jueces fue respondiendo en la prueba diseñada con ayuda de su laptop o dispositivo móvil como se muestra en la ***Figura 14***.

Tabla 4. Descriptores aromáticos de café.

Nota	Descriptor
Terrosa	Tierra
Herbal	Paja
Maderosa	Cedro
Especias	Clavo, pimienta
Verde	Grano de cilantro
Cálida	Vainilla, mantequilla, malta, caramelo
Floral	Flor de cereza
Frutal	Cereza cafeto, albaricoque
Off note	Cuero, tabaco, medicinal, caucho
Café	Pan tostado, chocolate amargo, café tostado
Frutos secos	Almendra, cacahuate, avellana, nuez.
Ahumado	Olor ahumado

Fuente: La Nariz del café®



***Figura 13**. Proceso de entrenamiento de panel*

a y b)La Nariz del café c)Entrenamiento de panel con la nariz del café d y e) Preparación y evaluación de muestras de gustos básicos e intensidades

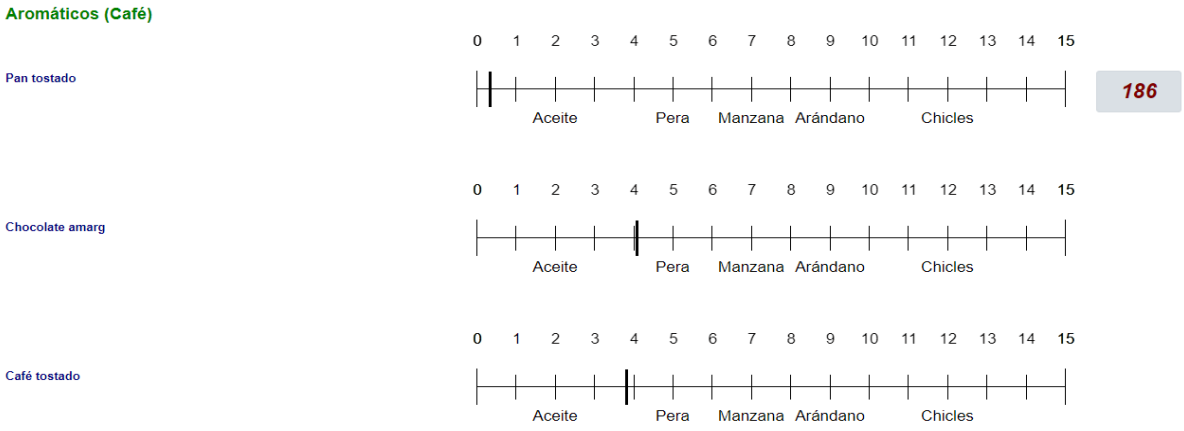


***Figura 14.** Prueba de perfil descriptivo diseñada con FIZZ® para aromáticos de café*

Fuente: Programa FIZZ®

Para las extracciones de las siete muestras de café se pesaron 35.25 g ± 0.25 g de café tostado y se molieron por separado en un molino manual de acero inoxidable Cazzenie con cuchillas cerámicas (Bold Retail Ventures, Zapopan, Jalisco) obteniendo un diámetro de partícula aproximado de 3 mm (SCAA, 2009b); tras la molienda, las muestras se colocaron en recipientes de cristal y se realizó la extracción agregando 640 mL de agua a 93±0.5°C con un hervidor de agua tipo cuello de ganso, en cumplimiento de la razón de café:agua recomendado por la SCA (0.055 g /mL); al verter el agua, el café hidratado flota y forma una capa de partículas sólidas, aceites esenciales y gases retenidos que se denomina costra del café (***Figura 15a***), que permanece en la superficie durante la infusión y que juega un rol importante para retener los volátiles); a los 4 min de infusión se rompió la costra con una cuchara y posteriormente se removió de la bebida. El tiempo total que el café molido se mantuvo en contacto con el agua fue de 5 min. Tras permitir que el café se enfriara durante aproximadamente 8 min adicionales, las bebidas fueron servidas a aproximadamente 62°C en vasos térmicos codificados para ser presentados a cada uno de los jueces, como se muestra en la **Figura 15b-d**. Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza y un análisis de componentes principales para la determinación de la diferencia significativa entre descriptores de cada muestra de café evaluadas (SCAA, 2009c).



Figura 15. *Evaluación de la bebida de café con y sin tratamiento de PAPH*
a) Extracción de la muestra b y c) Codificación y presentación de muestras d)Evaluación de muestras
FUENTE: PROPIA

3.5.3 Temporal Dominance of Sensations (TDS).

La metodología de Dominancia Temporal de Sensaciones (TDS) se trabajó con el panel de jueces entrenados para evaluar la percepción sensorial del café a lo largo del tiempo; con esto se detectan atributos que dominan en diferentes momentos mientras se prueba el producto. Para ello, se prepararon las extracciones como en se describió en la sección 3.5.2 y por medio

del software FIZZ® se le presentaron de forma simultánea en la pantalla de la computadora todos los atributos calibrados previamente. Durante la evaluación el juez seleccionó el atributo que consideró como dominante; una vez que la percepción cambiaba, el juez tenía que elegir el nuevo atributo relacionado; el cual podía repetirse durante 60 s una vez que la extracción de café se había ingerido Los descriptores utilizados fueron: amargor, acidez, astringencia, notas de café, notas cálidas, notas afrutadas, notas especiadas, notas florales, frutos secos y *off notes* (notas indeseables) (Labbe et al., 2009), los cuales se marcaban de forma virtual dentro del programa FIZZ®, como se muestra en la ***Figura 16***. Los resultados se expresarán como curvas en una imagen descriptiva donde se marcará el nivel de significación para cada muestra evaluada.

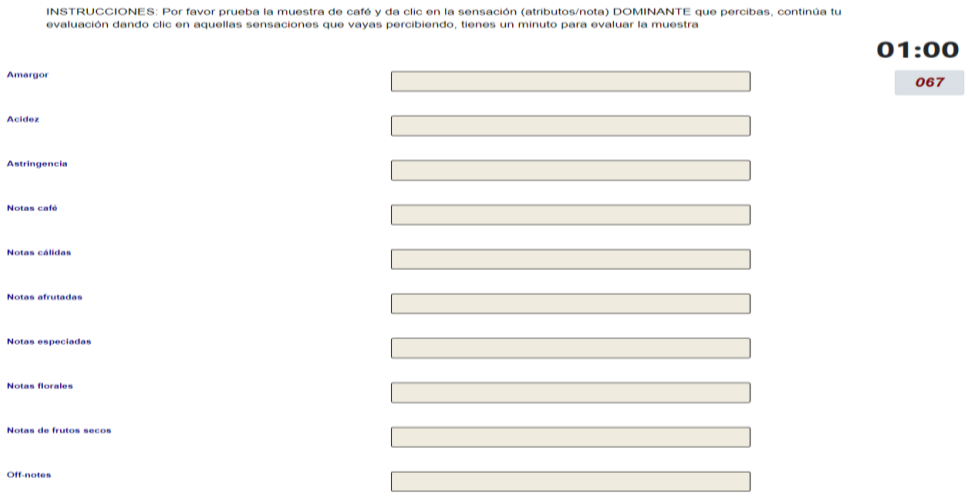


Figura 16*. Software FIZZ® para realizar la prueba de TDS*

Fuente: FIZZ®

3.6 Secuenciación masiva y recuento microbiano para caracterización de microbiota de café

Para evaluar el cambio en la población microbiana de las muestras de café sometido al PAPH se realizó una prueba de secuenciación masiva basada en amplicones de ADNr, técnica de biología molecular utilizada para identificar y caracterizar la composición microbiana de una muestra alimentaria sin necesidad de cultivo; estas se realizaron con el apoyo del personal del Campo Experimental Centro Altos de Jalisco del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, en Jalisco, México. Se tomaron muestras aleatorias de tres piezas de cerezas de café tratadas con 200 y 400 MPa (3, 5 y10 min) a 25°C y una muestra adicional sin tratar que sirvió como control; se extrajo ADN metagenómico de 250 µg de cada muestra y se utilizó para realizar secuenciación de alto rendimiento basada en amplicones de ADNr 16S

utilizando el kit de metagenómica 16S y la plataforma S5 Studio de Ion Torrent (Ruvalcaba-Gomez et al., 2020).

Paralelamente, para inferir las condiciones de calidad e higiene y detectar una posible contaminación de las muestras se evaluaron cuentas de microorganismos indicadores, como se describe a continuación. Se procesaron muestras de café cereza (*Coffee arabica* var. Marsellesa) con y sin tratamiento de PAPH, de cada una de las muestras se realizó un recuento de Bacterias mesófilas aerobias (BMA), coliformes totales (CT), Lactobacilos, hongos y levaduras (HyL) de acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas 092-SSA1-1994, 112-SSA1-1994 Y 111-SSA1-1994 respectivamente, cada sembrado se realizó por triplicado, los agares utilizados fueron Agar nutritivo para BMA, agar rojo bilis violeta para CT, MRS para Lactobacilos y PDA para hongos y levaduras; las temperaturas y tiempos de incubación para los tres primeros indicadores fue de 37°C/24h y del último de 28°C por 5 días. Los recuentos se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como Log de unidades formadores de colonia (UFC)/g de muestra.

3.7 Determinación de ácido clorogénico, trigonelina y cafeína por HPLC.

Toda la metodología desarrollada en esta sección se realizó de acuerdo con lo reportado por Awwad et al., (2021).

3.7.1 Curvas de calibración.

Se prepararon soluciones estándar de cafeína (C1778-1VL Sigma Aldrich) y ácido clorogénico (C3878-1G Sigma Aldrich) en concentraciones de 10, 50, 100, 200, 500 y 200 ppm; y de trigonelina (T5509-1G) en concentraciones de 5,10, 20, 40, 50, 100, 150 y 200 ppm. El área de cada pico obtenido para las concentraciones de los compuestos fue graficada contra la concentración y se calculó la respectiva ecuación de regresión lineal para cada tipo de componente.

3.7.2 Preparación de muestra.

Se pesaron 2.75 g de cada muestra y se colocaron en un vaso con 50 mL de agua a 92°C durante 4 min; transcurrido este tiempo se centrifugaron a 2000 rpm durante 15 min.

3.7.3 Desarrollo del método cromatográfico

La fase móvil utilizada para la determinación de cafeína y trigonelina fue una mezcla de agua/metanol (60:40, v/v), mientras que para los ácidos clorogénicos (CGA) se empleó una solución de ácido fórmico al 1%:acetonitrilo (85:15, v/v). Ambas fases móviles fueron desgasificadas durante 20 min en un baño ultrasónico. Las condiciones cromatográficas

incluyeron un flujo de 1 mL/min, volumen de inyección de 10 µL y una temperatura de columna de 30 °C. Las longitudes de onda utilizadas fueron 273 nm para cafeína y trigonelina, y 330 nm para CQA. El tiempo total de corrida para todos los compuestos fue de 8 min. El análisis se realizó en un sistema HPLC modelo Infinity 1260 (Agilent Technologies, California, EUA) equipado con detector de arreglo de diodos (DAD), auto muestreador y una columna Eclipse XDB-C18 (5 µm, 4.6 × 250 mm). Con los resultados obtenidos se realizó un análisis de varianza.

3.8 Identificación de compuestos aromáticos con cromatografía de gases acoplada a masas.

Se colocaron 3 g de muestra en un vial de 20 mL con tapa magnética y septum de teflón/silicón. La muestra fue agitada a 200 rpm y calentada a 50°C durante 1 h para su extracción con fibra de microextracción en fase sólida de 2 cm compuesta por PDMS/DVB/CAR (Supelco, Sigma Aldrich, California, EUA). La fibra fue desorbida térmicamente a 250°C en el puerto de inyección en modo *splitless* de un cromatógrafo de gases 7890A (Agilent Technologies, Inc., California, EUA), acoplado a un detector de espectrometría de masas cuadrupolar modelo 5975C (Agilent Technologies, Inc., California, EUA). Se utilizó una columna capilar DB-HeavyWAX (60 m x 250 µm de diámetro, 0.25 µm de espesor de fase) (Agilent Technologies Inc., California, EUA). El programa de temperatura del horno fue el siguiente: 40°C por 10 min, seguido de un incremento a 140°C con una velocidad de 3°C/min y tiempo de espera de 20 min, seguido de un incremento a 220°C con una velocidad de 3°C/min y tiempo de espera de 5 min, finalmente un incremento a 260ºC con una velocidad de 10°C/min donde se mantuvo por 15 min. El gas de arrastre utilizado fue helio (pureza 99.999%), a flujo constante de 1 mL/min. El detector de espectrometría de masas se utilizó en modo de impacto electrónico a 70 eV, con un factor de ganancia de 1, temperaturas de línea de transferencia, fuente de ionización y cuadrupolo de 280°C, 230°C y 150°C respectivamente, y un rango de masas de 33 a 600 uma. La identificación de los compuestos volátiles se realizó a partir de su espectro de masas, comparándolos con los espectros de la base de datos NIST Mass Spectra Library, v. 2017 (EUA) y se realizó un análisis de componentes principales para identificar agrupamientos y/o diferencias entre los datos.

3.9 Identificación de compuestos aromáticos con cámara de sensores.

Las siete muestras de café tostado fueron analizadas con un prototipo de nariz electrónica contenida en una cámara elaborada en policarbonato y conformada por un sistema de detección de seis sensores resistivos de gas de la familia MQ cada uno específico para cierto tipo de gases y/o compuestos orgánicos volátiles: MQ3 (alcoholes, etanol), MQ4 (metano, gas natural), MQ5

(metano, hidrógeno), MQ7 (monóxido de carbono), MQ8 (hidrógeno) y MQ9 (gases combustibles), los cuales están basados en un material semiconductor sensible (SnO_2) cuya resistencia cambia en presencia de ciertos gases y se encuentran conectados a un microcontrolador Arduino (Somerville, MA, EUA) que lee los datos de los sensores y se encuentra a su vez conectado a un equipo de cómputo para registrar los datos por medio de la interfaz gráfica LabVIEW (NI, Austin, Texas); el análisis de datos se hace a través algoritmos de redes neuronales. El sistema se complementa con un dispositivo de control de temperatura y una placa Peltier para calentar la muestra. Todo el sistema de detección se ha sometido como una solicitud de patente ante el Instituto Mexicano de Propiedad Intelectual (IMPI) (Pacheco-Aguirre et al., 2023).

La prueba consistió en precalentar el equipo durante 60 min y posteriormente colocar un grano de café molido en una bandeja de papel aluminio dentro de la cámara de sensores durante 30 min a 70°C. Se obtuvieron datos de los registros en voltios de corriente directa, los cuales provienen de los sensores responsivos que están colocados dentro de la cámara; los datos fueron recopilados para ser leídos en formato MS Excel 365 (Microsoft Corporation, Redmon, WA, EUA). Entre las corridas de cada muestra, la cámara se dejó abierta durante 5 min para permitir que los gases que se encontraban en el interior se difundieran al exterior (Morales, 2023). En la ***Figura 17*** se muestra el prototipo de nariz electrónica, con la distribución de sensories MQ y el sistema Peltier.

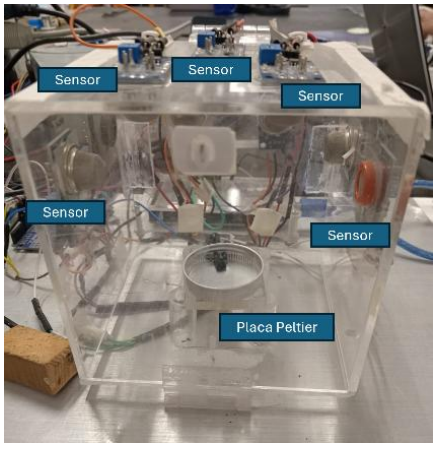


Figura 17. *Prototipo de nariz electrónica basada en sensores responsivos*
Fuente: Propia

3.9 Diseño de experimentos y análisis estadístico.

Se utilizó un diseño experimental con dos factores, alta presión hidrostática (dos niveles, 200 y 400 MPa) y tiempo (tres niveles, 3, 5 y 10 min), donde se generaron un total de 6 tratamientos y una muestra sin tratar que sirvió como control. Las variables dependientes fueron los parámetros fisicoquímicos (Aw, humedad, acidez, color, y pH; grupos indicadores de la calidad y bacterias lácticas (BMA, CT,H y L y Lactobacilos), precursores solubles de sabor (cafeína, trigonelina, ácido cloragénico), características descriptivas sensoriales y compuestos aromáticos.

Las mediciones se hicieron por triplicado y posteriormente los datos se analizaron por medio de un ANOVA de doble vía y las comparaciones entre medias se hicieron con una prueba de Tukey, con nivel de significancia de α=0.05 en el programa Minitab 18 ® (Minitab Inc., State College, PA, EUA), también se realizó un análisis de componentes principales para las pruebas de perfil sensorial y de compuestos volátiles en el programa XLSTAT® (Addinsoft, Francia).

IV. Discusión de resultados.

4.1 Materia prima

De una recolección de 18 kg de café cereza de variedad Marsellesa se obtuvieron15 kg efectivos de fruta tras el paso por criba y por el proceso de flotación para obtener frutos de madurez adecuada y libres de defectos para el procesamiento posterior. Las cerezas seleccionadas presentaron una concentración de sólidos solubles de aproximadamente 15°Brix (14.92±0.1). No se encontraron referencias sobre la magnitud de este parámetro para la variedad empleada específicamente en este proyecto, que es un híbrido de Sarchimor (Timor 832/2 x Villa Sarchi CIFC 971/10, desarrollada por la compañía ECOM y el centro de investigación CIRAD con especímenes obtenidos de Nicaragua) (WCR, 2025); sin embargo, el valor promedio obtenido fue muy bajo, considerando que las cerezas regularmente exhiben valores de grados Brix en el rango de 16 a 25°, dependiendo del grado de madurez de la fruta, la variedad y el origen geográfico. Por ejemplo, Silva et al., (2014) reportan valores de °Brix en el rango de 18.5 a 21° para variedades locales brasileñas, mientras que Torres Suárez et al. (2019) obtuvieron valores promedio de 17.1° Brix en cerezas de café peruanas de variedad Catucaí y Álvarez Andrade obtuvo una concentración promedio de sólidos solubles de 25.26°Brix en una variedad híbrida de Sarchimor en Ecuador. Dado que la prueba de flotación realizada garantizó que la fruta tuviese un grado de madurez adecuado (confirmado con su coloración roja uniforme), el valor relativamente bajo de grados Brix puede atribuirse limitaciones ambientales (altitud baja, lluvia o sombra excesiva) o factores genéticos (propios de la variedad) o fisiológicos (plantas jóvenes) (Descroix & Snoeck, 2009).

El lote se dividió en partes iguales para someter cada muestra a los tratamientos de PAPH correspondientes (200MPa-3min, 200 MPa-5 min, 200 MPa-10 min, 400 MPa-3 min, 400 MPa-5 min, 400 MPa-10 min) y un control.

4.2 Análisis fisicoquímicas en café cereza

A las cerezas control y aquellas tratadas por APH se les realizaron las pruebas fisicoquímicas descritas en la sección 3.3. Los resultados correspondientes se muestran en las ***Tablas 5** a **7**.*

Los valores promedio de L*, a*, b* del control fueron 16.49±1, 11.27±0.08 y 6.52±1, respectivamente, los cuales son semejantes a los reportados por Galarza & Figueroa (2022) (L= 20.04, a= 27.44, b= 9.09); se observa que los valores de L y b son similares a los promedios aquí obtenidos, a diferencia del valor de ***a*** que es considerablemente mayor. Las diferencias observadas en los parámetros de color pueden atribuirse, en parte, a factores como la variedad

de café utilizada (particularmente a la concentración y tipo de pigmentos presente), la altitud del cultivo y sus condiciones climáticas, así como al grado de madurez del fruto. Diversos estudios han documentado que los atributos primarios de color en frutas como la cereza de café varían conforme avanza la maduración (Silva et al., 2014). En su fase inmadura, el fruto presenta una tonalidad verde debido a la alta concentración de clorofilas; al madurar, estas se degradan dando paso a pigmentos como carotenoides y antocianinas, lo que se traduce en un color rojo característico. Por su parte, los frutos sobremaduros pueden adquirir tonos rojo-morados, reflejo del aumento en la concentración de antocianinas. En plantas como el café, los pigmentos orgánicos predominantes incluyen flavonoides (amarillo-anaranjado), antocianinas (azul-violeta y rojo) y quinonas (anaranjado, rojo siena y carmesí). La degradación de clorofilas ocurre a través de distintas rutas bioquímicas y está influenciada por factores como la exposición a la luz solar, lo cual impide establecer un color específico para definir el estado de madurez. Además, los cambios en los parámetros de color pueden deberse a la pérdida de humedad durante el secado, así como a reacciones químicas —enzimáticas o no enzimáticas— inducidas por el manejo postcosecha o por tratamientos tecnológicos aplicados a la cereza (Meléndez-Martínez, Vicario, & Heredia, 2004). Los valores de parámetros primarios de colorimetría triestímulo se muestran en la ***Tabla 5*** y los de los parámetros derivados del color de las cerezas tratadas por PAPH se muestran en la ***Tabla 6***.

Tabla 5. *Parámetros de color en cerezas tratadas con alta presión hidrostática.*

Presión (MPa)/tiempo (Min)	L *			a*		
	3	5	10	3	5	10
200	15.73±0.07^{Aa}	15.12±0.02^{Aa}	19.82±0.04^{Ab}	10.30±0.23^{Ba}	13.35±0.16^{Ab}	13.38±0.3 ^{Bb}
400	16.81±0.01^{Aa}	15.12±0.02^{Aa}	20.19±0.07^{Ab}	12.10±0.09^{Ab}	13.35±0.16^{Ab}	11.36±0.11^{Aa}

Presión (MPa)/tiempo (Min)	b*		
	3	5	10
200	6.63±0.23^{Aa}	13.56±0.16^{Ab}	15.7±0.48^{Ab}
400	10.66±0.09^{Ba}	13.56±0.16^{Ab}	14.23±0.06^{Ab}

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

De acuerdo con los datos de L* presentados en la ***Tabla 5***, el tratamiento de PAPH induce un aumento en la luminosidad de las cerezas de café, pero el tiempo de procesamiento es el principal factor que contribuye a su cambio significativo ($p<0.05$). Tanto a 200 como a 400 MPa,

L* se incrementó de manera significativa con respecto a los demás procesos PAPH a la misma presión y con relación al control. A partir de los 10 min, se observa un incremento notable en la claridad del fruto, debido a efectos físicos y posiblemente enzimáticos del proceso sobre la piel y pulpa; al analizar el agua de acompañamiento de las bolsas con cereza al finalizar el proceso PAPH por 10 min (a ambas presiones, pero en mayor magnitud a 400 MPa) pudo observarse que ésta presentaba una tonalidad rojiza evidente, señal de pérdida de compuestos fenólicos por lixiviación, lo que puede explicar el aumento de luminosidad en estas muestras. En contraste, el nivel de presión (200 vs 400 MPa) por sí mismo no produce diferencias significativas a ninguno de los tiempos de proceso. Resultados similares fueron observados al procesar blueberry a alta presión (600MPa, 5min), relacionándolo con el hecho de que los tratamientos de PAPH mejoran la extracción de antocianinas presentes en el tejido exterior de la fruta hacia el líquido de acompañamiento, lo que indirectamente provoca un aumento en la luminosidad (Paciulli et al., 2019). Por otra parte, Chen et al., (2016) reportan incrementos en el valor de L* al aplicar un tratamiento de 500 MPa/10 min en jugo de jengibre; esto puede deberse a que el tratamiento de PAPH puede generar rompimiento celular y por lo tanto una mayor acumulación del pigmento en el líquido tratado.

En cuanto al parámetro de color *a** (asociado al eje rojo–verde del sistema CIELab), se observó una influencia significativa tanto del nivel de presión como del tiempo de tratamiento ($p < 0.05$). A 200 MPa, el valor a* se incrementó progresivamente con el tiempo, alcanzando su punto más alto a los 10 min, lo que sugiere una intensificación del componente rojo conforme se prolonga el tratamiento. En contraste, a 400 MPa, el valor a* mostró un incremento inicial hasta los 5 min, seguido de una disminución significativa a los 10 min, lo cual podría estar relacionado con la degradación de pigmentos o alteraciones en la estructura superficial de la cereza inducidas por la mayor presión. Al comparar entre presiones en un mismo tiempo, se detectaron diferencias a 3 min de proceso, donde el tratamiento a 400 MPa resultó en valores de a* significativamente más altos que a 200 MPa; sin embargo, a los 10 min, la tendencia se invirtió. Estos resultados sugieren una interacción entre tiempo y presión que condiciona la estabilidad del componente rojo del fruto, y resaltan la importancia de optimizar ambos parámetros para preservar o modificar el color en función de los objetivos del proceso. El principal pigmento de la cereza roja madura es la antoncianina cianidina-3-rutinósido, la cual exhibe ese color a los niveles de pH usuales de esta fruta; esta antocianina se ha mostrado que es estable a tratamientos moderados de PAPH (200 MPa, 5 min); en general, las antocianinas son bastante estables a tratamientos PAPH menores a 350 MPa, 10 min, 25°C; la disminución de a* a 400 MPa, 10 min pudo deberse a la degradación de este pigmento.

En el parámetro *b** (relacionado con la intensidad del componente amarillo), se identificaron diferencias significativas tanto entre los niveles de presión como entre los tiempos de tratamiento ($p<0.05$). A 200 MPa, se observó un incremento notable del valor b* conforme aumentó el tiempo de proceso, alcanzando un máximo a los 10 min, lo que indica una mayor intensidad de tonos amarillos posiblemente vinculada con la descomposición de clorofilas o reacciones de pardeamiento inicial. A 400 MPa, el valor b* también aumentó con el tiempo, aunque el cambio fue menos marcado en comparación con 200 MPa. Al comparar entre presiones, se evidenció que a los 3 min, 400 MPa indujo un valor b* significativamente mayor que 200 MPa, mientras que a los 5 y 10 min las diferencias entre tratamientos fueron menores o no significativas. Estos resultados sugieren que la presión más alta acelera cambios iniciales en el color, pero que su efecto se estabiliza con el tiempo, en tanto que a 200 MPa se observa un incremento significativo del componente amarillo. La interacción entre tiempo y presión, por tanto, desempeña un papel relevante en la modulación de este atributo visual en las cerezas de café. El color amarillo de las cerezas se encuentra asociado a la presencia de diversos carotenoides (como β-caroteno, luteína, violaxantina, neoxantina) y de algunos flavonoides (Bastian et al., 2021). En términos generales, los carotenoides son mucho más estables que las antocianinas a tratamientos de PAPH, pues no exhiben degradación significativa de su estructura aún a niveles altos de presión (>500 MPa); adicionalmente, la alta presión puede romper membranas celulares y facilitar la liberación de los carotenos, generando un incremento en la concentración de estos pigmentos (Pérez-Lamela et al., 2021).

Los valores promedio de *chroma* (saturación) y *hue* (color básico de un objeto) en las cerezas control fueron de 13.08°±0.81 y 0.52°±1.0, respectivamente, diferentes a los reportados en cereza de café por Sudaryanto (2020) donde C fue de 3.42° y h de 0.002°. La diferencia observada en los parámetros puede explicarse por la variedad de cultivar que se esté utilizando y el no contar con información colorimétrica estandarizada que relacione la madurez del fruto (Carvajal et al., 2011). En las muestras de café cereza pretratada con PAPH se observa un aumento significativo ($p<0.05$) de estos parámetros en todos los tratamientos, a excepción del tratamiento 200 MPa/3min, que es aquel con menor magnitud de todos los implementados; el aumento *chroma* y *hue* a 200 y 400 MPa, puede relacionarse a la liberación de pigmentos en la piel de frutas (antocianinas y carotenoides en el caso de café cereza maduro), ya que a estas presiones no hay una destrucción enzimática completa, lo que da lugar al rompimiento parcial de la pared celular liberando pigmentos hacia la superficie que deriva en la intensificación visual del color. Se han reportado resultados similares en el comportamiento cromático de frutas (fresa, cereza, blueberry) como resultado de la aplicación de PAPH; para el caso de blueberries tratados

a 400 y 600 MPa (1 y 5 min) reportaron aumento de estos parámetros como resultado de alteraciones de las propiedades reflectantes de la superficie (Paciulli et al., 2019; Oey et al., 2008).

Tabla 6. Parámetros derivados de color triestímulo en cerezas de café tratadas con alta presión hidrostática.

Presión (MPa)/tiempo (Min)	Chroma			Hue		
	3	5	10	3	5	10
200	12.25±0.23^{Ab}	19.02±0.16^{Aa}	20.66±0.48^{Ba}	0.57±0.23^{Aa}	0.79±0.16^{Ab}	0.86±0.48^{Ab}
400	16.13±0.09^{Ab}	19.02±0.16^{Aa}	18.23±0.06^{Aa}	0.72±0.09^{Ba}	0.79±0.10^{Aa}	0.90±0.06^{Ab}

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

En la cereza control se obtuvieron valores promedios de °Brix de 14.93±0.01, el cual se encuentra dentro del rango óptimo de 12-24°Brix de una cereza lista para ser cosechada tras 240+ días tras la floración (Vidal, 2014); el valor promedio de humedad fue de 50.53±0.9, el cual coincide con los datos de Siqueira et al (2017) quienes mencionan que los valores de humedad de una cereza deben estar en el rango de 50-60% (p/p) dependiendo de la variedad, aunque algunas pueden alcanzar valores de humedad del 70% (Galarza & Figueroa, 2022). Por su parte, el valor de Aw fue de 0.93±0.0, el cual se considera apropiado para el contenido acuoso aquí reportado, dado que experimentalmente se espera una Aw≈0.95 para cerezas con mayor contenido de humedad (≈70%) (Kornman, 2016); se sabe que este parámetro es un indicador clave para evitar el crecimiento de microorganismos y garantizar la calidad del grano durante la fermentación y el secado. Esto es particularmente cierto para la fermentación natural, donde la fruta se procesa completa, manteniendo su contenido de humedad original; además, dado que el secado se realiza al sol sobre camas africanas o directamente en el suelo, este tiende a ser irregular, y un manejo inadecuado puede inducir contaminación microbiana, lo cual puede comprometer la inocuidad del proceso e inducir la descomposición del fruto por crecimiento de moho (Velásquez et. al, 2019). En cuanto a los valores promedio de pH (5.12±0.5) y acidez (2.13±0.2 g de ácido cítrico/100g cereza) se asemejan a los obtenidos por Galarza & Figueroa (2022); estos parámetros dependen de los ácidos generados durante la maduración del fruto y la variedad con la cual se esté trabajando; por último, los valores de índice de madurez promedio y de azúcares reductores de las cerezas recolectadas fueron de 7±0.51 y de 4.7±0.33,

respectivamente. Cabe mencionar que estos parámetros rara vez se toman en cuenta en la recolección del fruto como un indicativo del estado de madurez

Después del pretratamiento de alta presión se repitieron nuevamente las pruebas fisicoquímicas en las cerezas presurizadas; los resultados se muestran en la ***Tabla 7;*** el tiempo de tratamiento de 5 min no presentó diferencias significativas ($p<0.05$) en el valor de pH. Sin embargo, se observaron diferencias significativas a los 3 y 10 min de tratamiento en ambas presiones. En comparación con el control, el pH mostró un aumento, mientras que la acidez presentó una disminución significativa ($p<0.05$) entre las diferentes presiones y tiempos de tratamiento. Esta reducción podría deberse a que la presión afecta la disociación de los ácidos orgánicos liberados desde los compartimentos intracelulares. Además, algunas enzimas presentes en la fruta pueden permanecer activas por un corto periodo antes de ser inactivadas completamente por el tratamiento con PAPH, promoviendo la descomposición de ácidos, como el málico, mediante reacciones de descarboxilación. Como resultado, la acidez disminuye y el pH tiende a incrementarse. En el caso de la cereza de café, los principales ácidos orgánicos son cítrico, láctico, málico, quínico, succínico y clorogénico, los cuales pueden ser transformados por enzimas como catalasa y polifenoloxidasa presentes en el mucílago (Echeverri-Giraldo & Osorio-Pérez., 2024; Fernández Ruano Marina et al., 2020; Figueiredo De Abreu et al., 2018; Shifera-Terefe & Buckow, 2017). De manera similar, en otro estudio sobre los efectos de PAPH en pH de frutas se reporta una disminución de acidez de mango manila con respecto al control tras aplicar tratamientos de 75 y 150 MPa durante 5 y 10 min (Vargas Ortiz et al., 2013).

Los valores de grados °Brix no mostraron diferencias significativas ($p<0.05$) entre los niveles de presión, aunque sí entre los tiempos de tratamiento. En general, todos los valores disminuyeron en comparación con el control. Esta reducción podría deberse a la ruptura de moléculas de sacarosa presentes en la pulpa de la cereza, así como a la degradación de azúcares simples como glucosa y fructosa en el mucílago. Otra posible explicación es la ruptura de la estructura vegetal del fruto, lo que provoca la liberación del contenido intracelular, incluyendo azúcares que pueden disolverse en el agua contenida en la bolsa durante el tratamiento de alta presión; en este medio, también puede ocurrir un proceso de lixiviación (Barba, Esteve & Frígola, 2012). Por último, para azúcares reductores no se observa diferencia significativa entre los tratamientos por presión y tiempo, pero sí un aumento en comparación con el control; esto puede atribuirse a diversos factores como la liberación de azúcares solubles debido a la ruptura de compartimentos celulares o la degradación parcial de la matriz pectínica y desestructuración de tejidos, lo que mejora la extracción de azúcares (Jayachandran et al., 2015; Fachin et al., 2004). Este aumento también puede justificarse de manera análoga a lo que se

explicó para los cambios en valores de °Brix, ya que los monosacáridos del mucílago (glucosa y fructosa) pudieron ser liberados del interior de la célula como efecto de la presión sobre el fruto (Caballero-Figueroa et al., 2022b; Hall et al., 2022; Puerta-Quintero., 2000).

Tabla 7. Parámetros fisicoquímicos en café cereza atribuidos al tratamiento por alta presión hidrostática.

Presión (MPa)/tiempo (Min)	pH			Acidez (ácido cítrico/100g café)		
	3	5	10	3	5	10
200	6.23±0.36^{Bb}	5.24±0.02^{Aa}	6.23±0.48^{Aa}	1.90±0.05^{Ab}	1.33±0.00^{Aa}	1.4±0.06^{Aa}
400	5.88±0.15^{Aa}	5.88±0.16^{Aa}	5.24±0.13^{Bb}	1.95±0.05^{Ac}	1.53±0.06^{Ba}	1.74±0^{Bb}

Presión (MPa)/tiempo (Min)	°Brix			Azúcares reductores		
	3	5	10	3	5	10
200	12.86±0.12^{Aa}	9.55±0.28^{Ab}	8.88±0.02^{Ab}	7.41±0.12^{Aa}	9.53±0.28^{Ab}	6.85±0.02^{Aa}
400	12±0.08^{Ab}	9.55±0.04^{Aa}	9.85±0.04^{Aa}	9.16±0.08^{Aa}	9.53±0.04^{Aa}	9.86±0.04^{Ba}

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

4.3 Recuento microbiano

Tras evaluar la calidad de la secuenciación en las muestras de café con y sin tratamiento PAPH, no se obtuvo una respuesta amplificada suficiente para ser detectada, ni aun aplicando técnicas de enriquecimiento, por lo que no se pudo establecer cuáles eran los géneros de microorganismos sobrevivientes al tratamiento subletal de alta presión. Esto pudo a diversos factores, incluyendo algunos relacionados con la muestra en sí misma, pues un volumen insuficiente de muestreo o la selección de una fruta sin sobrevivientes pudo impedir esta identificación; asimismo, se ha observado que la hora de recolección y la heterogeneidad del ambiente pueden influir en la representatividad de la muestra y en la diversidad detectada y no reflejar la totalidad de la población microbiana. Otros más pueden atribuirse a la preparación de la muestra (un proceso de extracción insuficiente o a problemas con la preparación de la muestra, pues la presencia de cafeína o compuestos fenólicos pueden servir como inhibidores de la extracción de material genético) (Zhang et al., 2019) o al proceso de secuenciación, dado que la tecnología, los equipos y las técnicas empleadas pueden presentar distintos niveles de sensibilidad y especificidad, lo que implica que algunos microorganismos podrían no ser

detectados (Bioinformática, s.f.). Sin embargo, se considera que la principal razón para la incorrecta detección puede deberse al proceso de PAPH en si mismo, el cual puede causar fragmentación del material genético, impidiendo el correcto funcionamiento de las técnicas de amplificación o una biomasa tan baja que se encuentre por debajo de los límites de detección (Pérez Alcalá et al., 2023). Para proyectos futuros, será necesario evaluar la pertinencia de usar algún proceso para incrementar la microbiota sobreviviente, como un proceso de fermentación anaerobia en bolsa post tratamiento PAPH subletal o una maceración carbónica (da Silva Vale,et al., 2023).

Posterior al sembrado en placa se contaron las colonias de cada uno de los microorganismos indicadores (BMAs, CT, H y L, y lactobacilos) y se cuantificaron los microorganismos de acuerdo con las diluciones respectivas; los resultados se expresaron en Log UFC/g. Como se muestra en la ***Tabla 8***; la población de BMAs en el control fue de 5.98 Log UFC/g. En la cereza de café, las BMAs son parte de la microbiota nativa del fruto y del ambiente del cultivo; intervienen de manera primordial en la degradación del mucílago para llevar a cabo la fermentación natural del café; entre los principales géneros de bacterias nativas se encuentran Gram negativas como pseudomonas spp., enterobacter spp., klebsiella spp. y Gram positivas como Bacillus spp. Como puede observarse en la misma tabla, el tratamiento de PAPH indujo una disminución en la población de BMAs a ambos niveles de presión, pero, como era esperado, fue significativamente ($p < 0.05$) mayor a 400 MPa. Esto puede deberse a que la presión causa daño en las membranas y paredes celulares, alterando su permeabilidad. A 400 MPa, las células microbianas son más susceptibles, ya que diversas proteínas se desnaturalizan, comprometiendo su viabilidad. Se ha observado que la PAPH aplicada en bebidas como cerveza y vino puede funcionar como una etapa de selección microbiana, favoreciendo el crecimiento de microorganismos resistentes a la presión, los cuales pueden dominar la fermentación y generar perfiles sensoriales distintos (Buzrul, 2012). En cuanto a la población de CTs, se observó que la muestra sin tratamiento presentó una cuenta logarítmica de 5.15, mientras que en las muestras sometidas a PAPH no se detectó la presencia de estas bacterias. Este resultado puede explicarse porque los coliformes presentan una menor barorresistencia que las BMAs, pues poseen una pared de peptidoglucano muy delgada seguida de una membrana citoplasmática, estructura más débil y susceptible a los tratamientos de alta presión, en particular aquellos superiores a 400 MPa. De esta manera, se justifica la disminución en los recuentos observada en las muestras tratadas, considerando además que la resistencia microbiana puede variar según la especie, el estado fisiológico y las condiciones ambientales (De Carvalho Neto et al., 2018; De Oliveira Junqueira et al., 2019; Martins et al., 2020; Pothakos et al., 2020).

Con relación al recuento de bacterias ácido-lácticas (BAL), el control presentó un valor de 6.41 log, mientras que a 400 MPa se observó una reducción de aproximadamente cuatro ciclos logarítmicos a los tres tiempos evaluados, y de alrededor de dos ciclos para los tratamientos a 200 MPa. Estas reducciones de población se atribuyen al daño en la membrana plasmática, la desorganización de la pared celular y la desnaturalización proteica. Se ha reportado que especies como *Lactobacillus plantarum* pueden exhibir una barorresistencia importante, sobreviviendo aún a tratamientos a 250 MPa. Este microorganismo desempeña un papel relevante en la fermentación del café por vía seca, ya que contribuyen a la reducción del pH en la superficie del grano, lo que inhibe el desarrollo de bacterias indeseables, como enterobacterias y coliformes. Además, influyen en la formación de precursores aromáticos que, durante el tostado, aportan mayor complejidad sensorial con notas frutales, dulces y vinosas. Por ello, será necesario evaluar si las reducciones observadas tras el tratamiento con PAPH afectan de manera positiva o negativa el perfil sensorial de la bebida (Rendueles et al., 2011; Parras, 2010; Zalán et al., 2010; de Bruyn et al., 2017; Bertrand et al., 2012).; algunos reportes recientes incluso consideran también la posibilidad de inocular BAL como cultivos iniciadores después del tratamiento (Shen, 2024; Demarinis, 2022). En cuanto al recuento de hongos y levaduras, el tratamiento control presentó un valor de 6.65 Log (UFC/mL). De manera similar a lo observado en los demás indicadores microbianos, se evidenció una disminución en la población tras la aplicación de los tratamientos con PAPH. Dicha reducción fue significativa ($p<0.05$) entre los tratamientos de 200 y 400 MPa, siendo este último el que mostró una disminución inferior a medio ciclo logarítmico. Este comportamiento puede atribuirse a la alta resistencia estructural de la pared fúngica, constituida por la membrana citoplasmática, una capa de quitina-glucano y una capa externa de proteínas, las cuales actúan como barreras protectoras frente al daño mecánico ocasionado por la presión. En concordancia con lo reportado por Patterson (2005) y Puerta et al. (2012), la aplicación de presiones cercanas a 200 MPa puede ocasionar una reducción parcial, principalmente en levaduras sensibles y algunos hongos filamentosos, aunque sin garantizar su completa inactivación; mientras que a 400 MPa la inactivación tiende a ser más pronunciada. Por consiguiente, los resultados obtenidos en este estudio confirman la influencia del nivel de presión sobre la sensibilidad diferencial de estos microorganismos. A manera de resumen, en la ***Figura 18*** se presenta la evolución de las poblaciones de los indicadores analizados en cada uno de los tratamientos evaluados.

***Tabla 8**. Recuento de microorganismos indicadores en café cereza con y sin tratamiento de PAPH*

Presión (MPa)/tiempo (Min)	BMA			CT			BAL		
	3	5	10	3	5	10	3	5	10
200	4.17±0.19 ^{Ab}	3.89±0.09^{Ab}	4.28±0.03^{Aa}	0	0	0	4.54±0.1 ^{Aa}	4.18±0.11 ^{Ab}	3.69±0.07 ^{Ac}
400	2.58±0.17 ^{Bb}	3.05±0.01^{Ba}	2.74±0.26 ^{Bb}	0	0	0	2.65±0.13 ^{Bb}	2.82±0.06 B^{ab}	2.92±0.02 ^{Ba}

Presión (MPa)/tiempo (Min)	HyL		
	3	5	10
200	5.35^{a}±0.71 ^{Bb}	6.39±0.06^{Aa}	4.03±0.12 ^{Bc}
400	6.23±0.58 ^{Aab}	5.89±0.25^{Bab}	5.62±0.28 ^{Aab}

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

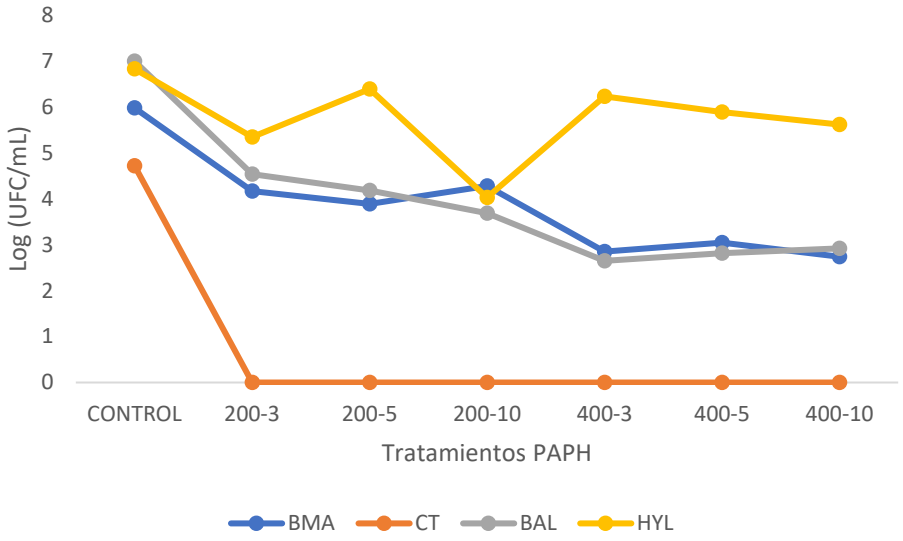


***Figura 18.** Conteo de BAL, CT , BMA, H y L en muestras de café natural tratadas con PAPH vs Control*

4.4 Cambios post beneficiado en café verde

Después de la fermentación natural de los 15 kg de café cereza se obtuvieron 5.52 kg de café bola, de los cuales, tras el proceso de trilla, se obtuvo un lote final de 2.76 kg de café verde. La muestra sin pretratamiento presentó un porcentaje de humedad de 11.2 ± 0.2 % (***Tabla 9***), valor que se encuentra dentro de los límites establecidos por la Norma Mexicana NMX-F-551-SCFI-2008 para café verde, lo cual indica que el proceso de secado fue adecuado para garantizar la conservación del grano. En cuanto a la actividad de agua (Aw), se obtuvo un valor de 0.55 ± 0.00, lo que sugiere que se establecieron condiciones favorables para la estabilidad microbiológica del producto.

En las muestras tratadas con PAPH no se observaron diferencias significativas ($p<0.05$) en los valores de Aw, lo cual indica que la aplicación de presión no afectó de manera relevante este parámetro. No obstante, las muestras mantuvieron valores inferiores a 0.76, umbral crítico por debajo del cual se reduce significativamente la posibilidad de crecimiento de hongos productores de micotoxinas, como *Aspergillus ochraceus* (Juárez González et al., 2021; Osorio et al., 2024). Esto resulta relevante desde el punto de vista de la inocuidad, ya que asegura un entorno físicoquímico poco favorable para el desarrollo de microorganismos deteriorantes o potencialmente toxigénicos, siempre que la temperatura de almacenamiento se mantenga por debajo de 25 °C. Por otro lado, los valores de humedad no mostraron diferencias significativas ($p<0.05$) entre los tratamientos a distintas presiones y tiempos de proceso, aunque al comparar los valores del control con los de las muestras tratadas con PAPH se observó una ligera disminución en la humedad y en la Aw. Este comportamiento podría atribuirse a la ruptura de membranas celulares ocasionada por la alta presión hidrostática, la cual favorece la liberación de agua intracelular y de solutos como azúcares, ácidos orgánicos y sales. Estos solutos disminuyen la Aw y facilitan una mayor pérdida de humedad durante el secado. Lo anterior concuerda con lo reportado por Janowicz y Lenart (2018), quienes observaron que el uso de PAPH como pretratamiento en el secado de manzanas redujo tanto el contenido de humedad como la Aw de los productos finales, incrementando así su estabilidad microbiológica. En este sentido, los resultados del presente estudio sugieren que la aplicación de PAPH, además de no afectar negativamente la composición del café verde, podría contribuir a mejorar su estabilidad durante el almacenamiento y a reducir los riesgos de deterioro microbiano.

Tabla 9. Porcentaje de humedad y actividad de agua en café verde

Presión/ (MPa)	**Aw***			**% Humedad***		
	t (min)			t (min)		
	3	5	10	3	5	10
200	0.49±0.00 ^{Aa}	0.53±0.00 ^{Aa}	0.53±0.00 ^{Ab}	10.8±0.29 ^{Aa}	10.6±0.32 ^{Aa}	10.63±0.21 ^{Aa}
400	0.53±0.00 ^{Aa}	0.51±0.00 ^{Aa}	0.54±0.00 ^{Aa}	10.93±0.10 ^{Aa}	10.82±0.17 ^{Aa}	10.97±0.05 ^{Aa}

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p <0,05$)

En cuanto a las mediciones de color (***Tabla 10***), la luminosidad (L*) del café verde presentó diferencias significativas ($p<0.05$) entre los distintos niveles de presión, aunque no se observaron diferencias entre los tiempos de proceso dentro del tratamiento a 200 MPa. En el caso del ángulo de matiz (H°), se identificaron diferencias significativas ($p<0.05$)) tanto en los

parámetros de presión como en los de tiempo de aplicación. Por su parte, el valor de *chroma* (C*) mostró diferencias significativas ($p<0.05$) entre las presiones aplicadas, pero no entre los tiempos dentro del nivel de 200 MPa. Los valores del control del café verde fueron L* = 41.05 ± 0.02, C* = 18.05 ± 0.10 y H° = 1.29 ± 0.05, los cuales resultaron menores en comparación con los obtenidos en las muestras tratadas con PAPH. Este comportamiento podría asociarse a que, durante la aplicación del pretratamiento, la presión ejercida sobre las cerezas de café provoca la disrupción de las membranas celulares, favoreciendo la liberación de pigmentos intracelulares que se dispersan de manera más homogénea en el tejido. Este fenómeno incrementa la saturación del color, reflejada en valores más altos de los parámetros *a* y *b*, lo que a su vez se traduce en un aumento del valor de *chroma* (mayor intensidad o pureza del color). Asimismo, el café cereza contiene pigmentos y compuestos fenólicos, principalmente ácidos clorogénicos, que tras la aplicación de PAPH pueden liberarse y reaccionar con otros pigmentos naturales, modificando los valores del ángulo de matiz (H°). Estos resultados son consistentes con lo reportado por Janowicz y Lenart (2018), Juárez González et al. (2021) y Salar et al. (2021), quienes observaron efectos similares en matrices vegetales tratadas con alta presión hidrostática, donde la redistribución de pigmentos derivó en un aumento de la saturación y una modificación perceptible del tono del color. Finalmente, es importante señalar que el color del café verde no depende únicamente del tratamiento aplicado, sino también de factores intrínsecos como la variedad del grano, el grado de madurez del fruto y las condiciones climáticas a las que estuvo expuesto durante su desarrollo, los cuales pueden influir en la concentración y estabilidad de los pigmentos responsables de la coloración final del grano.

***Tabla 10**. Luminosidad, chroma y hue en café verde pretratado por PAPH.*

Presión (MPa)	L			Chroma			Hue (H°)		
	t (min)			t (mn)			t (min)		
	3	5	10	3	5	10	3	5	10
200	42.84±1.96^{Ba}	43.54±0.01 ^{Aa}	43.39±0.01^{Aa}	19.91±0.22^{Aa}	20.21±0.05^{Aa}	20.22±0.08^{Aa}	1.42±0.03 ^{Bb}	1.39±0.00^{Ba}	1.38±0.00^{Ba}
400	47.12±0.44^{Ab}	46.93±0.01 ^{Bb}	42.70±0.20^{Aa}	23.61±0.44^{Ba}	24.85±1.32^{Bb}	22.69±0.05^{Ba}	1.32±0.02 ^{Ab}	1.30±0.01^{Aa}	1.29±0.00^{Aa}

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p <0,05$)

4.5 Tostado

A partir del lote de café verde se obtuvieron 2.16 kg, de los cuales se destinaron a la preparación de micro lotes de 183.8 g para cada uno de los tratamientos, incluyendo el control.

Debido a lo reducido de la muestra disponible, se intentó emplear un tostador a escala de laboratorio; sin embargo, ante la imposibilidad de contar con dicho equipo, se adaptó un tostador convencional para realizar el proceso. Como consecuencia, no fue posible efectuar triplicados del tostado para cada muestra, lo que representa una limitación metodológica a considerar.

En la ***Tabla 11*** se presentan los pesos iniciales del café verde que para todos los tratamientos incluyendo el control fue de 183.8 g y los pesos finales del café tostado, así como los porcentajes de pérdida de masa obtenidos durante el proceso. La temperatura de tostado utilizada para todas las muestras fue de 190 °C, con un tiempo total de 7.68 min, lo cual fue adecuado para obtener un tueste medio. Estos valores se encuentran dentro del rango recomendado por la *Specialty Coffee Association* (SCA), que establece temperaturas entre 180 y 250 °C para procesos de tostado controlado. Dichas condiciones son comparables con las reportadas por Díaz et al. (2018), quienes realizaron el tostado de café a 180 °C en un equipo a escala de laboratorio durante 9 min.

Tabla 11. *Pérdida de peso en café pretratado por PAPH sometido a tostado medio.*

Presión (MPa)	**Peso inicial (g)**			**Peso final (g)**			**% Pérdida**		
	t (min)			t (min)			t (min)		
	3	5	10	3	5	10	3	5	10
200	183.8			159.6	157.6	158.6	13.16	14.25	13.72
400	183.8 183.3			158.6	160.4	158.6	13.72	12.73	13.71
Control				158.6			13.71		

* Promedio de tiempo de proceso 7.68 ± 0.08 min y temperatura de 195.49±0.08

En la ***Figura 19*** se presenta una curva térmica típica correspondiente al perfil de tostado, la cual permite observar la evolución de la temperatura del grano a lo largo del tiempo y la estabilidad del calentamiento alcanzada durante el proceso. En la curva, el eje de las abscisas representa el tiempo de secado (min) y el eje de las ordenadas tienen una doble escala, la temperatura del aire del tostador y del grano (a la izquierda) y la tasa de cambio de temperatura (°C/min). En esta figura pueden observarse las fases típicas de calentamiento del grano (curvas continuas azules) delimitadas por tiempos específicos: el denominado *turning point* (TP, t= 1 min, 10 s; T= 91.6°C) también conocido como *turn around*, que corresponde al tiempo al cual la temperatura del grano se iguala a aquella del tambor de secado y a partir del cual empieza a calentarse y marca el inicio del secado; el fin del secado (DE, t=5 min 32 s; T=160°C), que corresponde al periodo de formación de color del grano, donde la humedad superficial ha sido removida y reacciones de pardeamiento no enzimático (fundamentalmente Maillard) otorgan al

grano un color amarillo, en particular por encima de 120°C; además, inicia la expansión del grano. Al sobrepasar la temperatura DE (160°C), se inician reacciones de caramelización, pues a esta temperatura inician la degradación térmica de azúcares, aunque todavía se desarrollan reacciones de Maillard con menor intensidad. Posteriormente, a los 7 min 8 s (T=186.5°C) ocurre el primer *crack* (FC) y hacia los 7 min 48 s inicia el periodo de enfriamiento, sin presentarse un segundo *crack*. Este comportamiento confirma que las condiciones de tostado aplicadas fueron adecuadas para obtener un café con tueste medio, con desarrollo homogéneo del color y de los compuestos asociados al aroma característico del café tostado. En la ***Figura 19*** se muestra la apariencia del café pretratado por PAPH, tras el proceso de tueste medio.

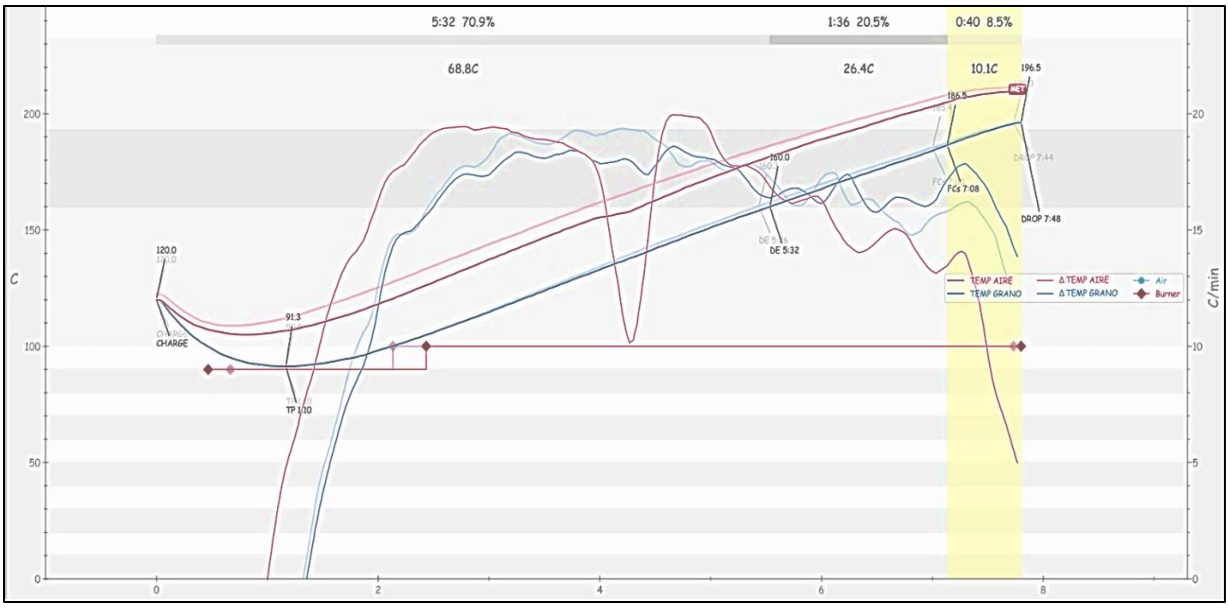


Figura19. *Perfil de tostado para café verde pre tratado por PAPH*

Fuente: Software del equipo tostador de café de Panela Canela



Figura 20. *Coloración del café después del proceso de tostado*

Fuente: Software del equipo tostador de café de Panela Canela

Asimismo, se realizaron mediciones de color, contenido de humedad y actividad de agua después del proceso de tostado. En la ***Tabla 12*** se observa que los valores de luminosidad (L*) presentan diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$)) entre los tratamientos de presión y tiempo. Al comparar estos resultados con los obtenidos en el café verde, se aprecia una disminución en los valores de L*, lo cual refleja el cambio de color característico del proceso de tostado, en el que el tono verde–amarillento del grano se transforma en marrón oscuro. Este cambio se asocia principalmente a reacciones químicas como la reacción de Maillard, que ocurre entre azúcares reductores y aminoácidos dando origen a melanoidinas, así como a los productos de la caramelización de los azúcares presentes. De manera similar, se observaron diferencias significativas ($p<0.05$) en el parámetro de chroma (C*) entre los tratamientos de presión, aunque no entre los distintos tiempos aplicados a una misma presión. Conforme avanza el tostado, el color del grano se torna más oscuro, lo que se traduce en una disminución de la intensidad cromática. Por otro lado, los valores de matiz (H°) no mostraron diferencias significativas ($p<0.05$) entre presiones a 3 y 10 min, pero sí en el tratamiento de 5 min. El cambio en el matiz también responde al proceso de tostado, durante el cual el grano evoluciona de un tono verde–amarillo hacia uno marrón–rojizo, resultando en valores más bajos de H° en comparación con los del café sin tostar (Arismendy, 2015; Osorio & Pabón, 2022; Portillo, 2022).

Tabla 12*. Parámetros de color instrumental para el café tostado de frutos tratados por PAPH vs control.*

Presión (MPa)	Luminosidad			Chroma		
	t (min)			t (min)		
	3	5	10	3	5	10
200	24.45±0.02^{Ab}	22.15 ± 0.01^{Aa}	22.53 ± 0.22^{Ab}	13.628 ± 0.06 ^{Ab}	12.73 ± 0.06 ^{Aa}	13.38 ± 0.08 ^{Aa}
400	26.20 ± 0.0 ^{Bc}	23.38 ± 0.07^{Bb}	23.23 ± 0.79^{Ba}	16.88 ± 0.05 ^{Bb}	14.75 ± 0.07 ^{Ba}	14.19 ± 0.58 ^{Ba}

Presión (MPa)	Hue		
	t (min)		
	3	5	10
200	1.01 ± 0.01^{Ac}	0.95 ± 0.01^{Ab}	0.92 ± 0.01^{Aa}
400	0.99 ± 0.003^{Ab}	0.98 ± 0.004^{Bb}	0.92 ± 0.03 ^{Aa}

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p <0,05$)

En cuanto a los valores de actividad de agua (Aw) y porcentaje de humedad, no se observaron diferencias significativas ($p<0.05$) entre los distintos tratamientos de presión y tiempo de PAPH, como se muestra en la ***Tabla 13***. Los valores de humedad se encuentran por debajo del límite máximo establecido por la NMX-F-013-SCFI-2010 y son similares al valor obtenido en el control (3.1%). El proceso de tostado provoca una rápida evaporación de la humedad interna del grano, ya que durante este proceso el agua contenida se elimina progresivamente. Estos resultados coinciden con los reportados por Pérez (2016), quien observó valores similares tras realizar un tostado a 160–170 °C durante 10–12 min. Por otro lado, en relación con el PAPH aplicado a las cerezas previo a la fermentación y posterior tostado, se mencionó en la sección 4.3.1 que, según Janowicz y Lenart (2018), el uso de esta tecnología como pretratamiento en el secado de manzanas dio lugar a productos finales con menor contenido de humedad y Aw. Un comportamiento similar se observó en el presente estudio: los granos de café verde obtenidos tras la fermentación natural presentaron valores inferiores de humedad y Aw en comparación con el control, tendencia que se mantuvo después del tostado (% humedad = 2.45; Aw = 0.30).

Tabla 13. *Valores de actividad de agua y porcentaje de humedad en café tostado.*

Presión (MPa)	Aw			Humedad		
	t (min)			t (min)		
	3	5	10	3	5	10
200	0.27 ± 0.001^{Aa}	0.27 ± 0.001^{Aa}	0.27 ± 0.001^{Aa}	2.14 ± 0.31^{Aa}	2.18 ± 0.24^{Aa}	2.4 ± 0.27^{Aa}
400	0.27 ± 0.009^{Aa}	0.27 ± 0.001^{Aa}	0.27 ± 0.001^{Aa}	2.18 ± 0.24^{Aa}	2.36 ± 0.30^{Aa}	2.43 ± 0.1^{Aa}

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p <0,05$)

4.6 Caracterización sensorial del café

4.6.1. Calibración del panel.

Durante la fase de calibración, en la primera sesión se presentaron a los jueces preentrenados tiras aromáticas con los descriptores olfativos del kit *La Nariz del Café*®, con el propósito de que realizaran asociaciones entre cada descriptor y su correspondiente referencia sensorial. Las segundas y terceras sesiones se destinaron a la estandarización y repaso de dichos descriptores. En la cuarta sesión, los jueces realizaron una simulación utilizando el software FIZZ®, con el fin de familiarizarse con las escalas y los descriptores empleados, utilizando para ello un café comercial. Finalmente, en la quinta sesión se llevó a cabo la evaluación de las muestras de café (perfil sensorial y TDS), tanto con tratamiento de PAPH como sin él. En la ***Tabla 14*** se muestran los descriptores que los jueces debieron identificar y calibrar, así como un ejemplo de asociación elaborado por uno de ellos.

4.6.2 Perfil descriptivo

Tras las pruebas preparatorias realizadas con FIZZ®, se determinó el perfil descriptivo de las bebidas de café con y sin tratamiento de alta presión hidrostática (PAPH). En la ***Tabla 15*** se presentan los valores promedio de las intensidades correspondientes a los 18 descriptores identificados por los jueces. Cabe señalar que, aunque el entrenamiento incluyó 25 descriptores, solo 18 fueron reconocidos en las muestras evaluadas.

Las intensidades de los descriptores que aumentaron significativamente como resultado del tratamiento con PAPH, en comparación con el control, fueron los siguientes: Ácido (400 MPa, 3 y 5 min); Amargo (200 y 400 MPa, 3 min); Astringencia (200 y 400 MPa, 3 min), Chocolate amargo (400 MPa, 10 min); Café tostado (400 MPa, 5 y 10 min); Cuerpo (200 MPa, 10 min; 400 MPa, 3 min), y Olor ahumado (400 MPa, 3 y 5 min).

Tabla 14*. Ejemplo del formato de términos de asociación de un juez con los descriptores de referencia.*

	Código	**Descriptor**	**Asociación**
1	442	Tierra	Pared húmeda mohosa
2	926	Paja	Manzanilla
3	329	Cedro	Resina de pino
4	56	Clavo	Eugenol
5	218	Pimienta	Pimienta, pirul
6	896	Grano de cilantro	Geranio, semilla de cilantro
7	557	Vainilla	Nieve de vainilla
8	536	Flor de cereza	Jazmín
9	860	Cereza de café	Hule de ferretería
10	637	Albaricoque	Gomita de colores
11	971	Mantequilla	Toffee (caramelo)
12	462	Cuero	Plumón esterbrook
13	823	Pan tostado	Maíz tostado, fritos amarillos
14	524	Malta	Dona de maple
15	989	Caramelo	Caramelo de flan
16	876	Chocolate amargo	Chicloso tootsie
17	320	Almendra	Galletas recién horneadas
18	104	Cacahuate	Crema de cacahuate
19	529	Avellana	Ferrero rocher
20	25	Nuez	Nuez (nieve corriente)
21	161	Ahumado	Mezquite
22	995	Tabaco	Té negro muy fuerte
23	853	Café tostado	Plástico quemado, resina epóxica
24	642	Medicinal	Alcanfor, pomada para reumas
25	348	Caucho	Pelota nueva, vinilo, hule.

Por otro lado, las intensidades de los descriptores que disminuyeron significativamente fueron: metálico (todos los tratamientos); tierra/paja (200 MPa, 5 min; 400 MPa, 10 min), flor de cereza–cerezo cafeto (200 y 400 MPa, 5 min; 400 MPa, 10 min), y pimienta–cedro (400 MPa, 5 y 10 min).

Entre los descriptores identificados en las muestras tratadas con PAPH, los que coinciden con los reportados en la rueda de sabores del café de la SCA incluyen: chocolate, amargo, ácido, café tostado, nuez, flor y frutos secos. Es importante señalar que el perfil sensorial del café cambia según la variedad y el proceso de fermentación. En este estudio, donde se empleó una fermentación natural, el perfil se caracterizó por descriptores como frutos rojos y negros, vino, tropical, dulce, cuerpo pesado y frutos secos. Este tipo de fermentación suele mostrar mayor variabilidad debido a la diversidad microbiana involucrada (levaduras, bacterias y hongos), así como a las condiciones de fermentación (duración, temperatura y oxigenación), la variedad del

Tabla 15. *Promedios de los descriptores identificados en cada bebida de café con y sin tratamiento de PAPH*

		200 MPa			400 MPa		
Descriptor	CONTROL	3 min	5 min	10 min	3 min	5 min	10 min
Ácido	3.35^{BC}	4.58^{A}	2.91^{CD}	2.08^{D}	4.65^{A}	4.63^{A}	3.84^{AB}
Amargo	3.24^{C}	4.67^{A}	2.47^{D}	3.65^{BC}	4.84^{A}	4.74^{A}	4.3^{AB}
Astringencia	3.14^{C}	4.22^{A}	1.41^{E}	3.7^{AB}	4.81^{D}	4.01^{AB}	3.46^{BC}
Metálico	3.4^{B}	0.24^{A}	0.02^{A}	0.01^{A}	0.01^{A}	0.01^{A}	0.01^{A}
Tierra	0.03^{BC}	0.01^{A}	0.19^{A}	0.01^{A}	0.01^{A}	0.42^{A}	0.24^{A}
Paja	0.07^{C}	0.02^{C}	0.59^{BC}	0.77^{B}	2.14^{A}	2.45^{A}	1.88^{A}
Flor cereza	0.04^{A}	0.01^{A}	0.00^{A}	0.01^{A}	0.92^{A}	0.2^{A}	0.02^{A}
Cereza cafeto	3.22^{A}	2.23^{BC}	1.16^{DE}	1.38^{D}	2.64^{AB}	1.69^{CD}	0.62^{E}
Pimienta	0.41^{A}	0.01^{B}	0.5^{A}	0.01^{B}	0.54^{A}	0.05^{B}	0.01^{B}
Cedro	0.06^{B}	2^{D}	1.25^{A}	0.93^{A}	0.01^{B}	0.82^{A}	3.03^{C}
Olor ahumado	0.4^{C}	2.83^{AB}	2.56^{B}	2.39^{B}	3.35^{A}	2.4^{B}	2.81^{AB}
Cacahuate	2.13^{C}	4.28^{A}	2.93^{B}	1.28^{D}	3.58^{B}	3.09^{B}	4.42^{A}
Malta	2.32^{CD}	3.81^{B}	2.73^{C}	1.9^{D}	3.85^{AB}	4.46^{A}	4.26^{AB}
Pan tostado	3.87^{AB}	3.25^{BC}	2.11^{DE}	1.3^{E}	2.8^{CD}	3.07^{BCD}	4.37^{A}
Chocolate amargo	2.00^{D}	5.14^{AB}	3.77^{C}	2.2^{D}	4.4^{BC}	4.39^{BC}	5.84^{A}
Café tostado	3.61^{B}	3.79^{B}	2.04^{C}	2.27^{C}	4.07^{AB}	3.51^{B}	4.53^{A}
Tabaco	3.16	2.79	2.14^{C}	1.4^{C}	2.77^{AB}	2.42^{B}	2.79^{A}
Cuerpo	$2.26C^{D}$	2.93^{B}	1.74^{D}	1.78^{D}	3.98^{A}	3.85^{A}	2.87^{BC}

* Los valores indican la Media (n = 8)
A medias con superíndice diferente en la misma columna de cada variable tienen diferencia significativa (p <0,05)

café, la altitud del cultivo y la falta de estandarización del proceso natural, que puede verse influido por factores ambientales como el clima. En un estudio realizado por Ribeiro et al., (2018),

se observó que tres variedades de café arábica con idénticas características climáticas y de cultivo presentaron diferencias sensoriales, microbiológicas y en compuestos volátiles. De igual modo, Flórez Arenas (2022) reportó variaciones significativas en las características sensoriales de cafés sometidos a cinco procesos de fermentación con diferentes tiempos.

En la ***Figura 21*** se presentan los resultados del análisis de componentes principales (ACP) del perfil sensorial del café con y sin tratamiento de PAPH; se observa que con dos componentes fue posible explicar 65.86 % de la variabilidad total de las muestras. El componente 1, ubicado en la región positiva (lado derecho del eje vertical), explica 43.04 % de la variabilidad y está positivamente relacionado con las muestras tratadas a 400 MPa (3, 5 y 10 min) y a 200 MPa, 3 min, agrupadas en el elipse naranja. Los descriptores asociados a este grupo incluyen: tabaco, pan tostado, astringencia, café tostado, ácido, cuerpo, amargo, cacahuate, chocolate amargo, olor ahumado, cedro, flor de cereza, malta, paja y tierra. Estas muestras presentan un perfil sensorial más intenso, tostado y complejo, atribuible a los complejos fenómenos bioquímicos y fisicoquímicos inducidos en las células vegetales del café cereza por el PAPH.

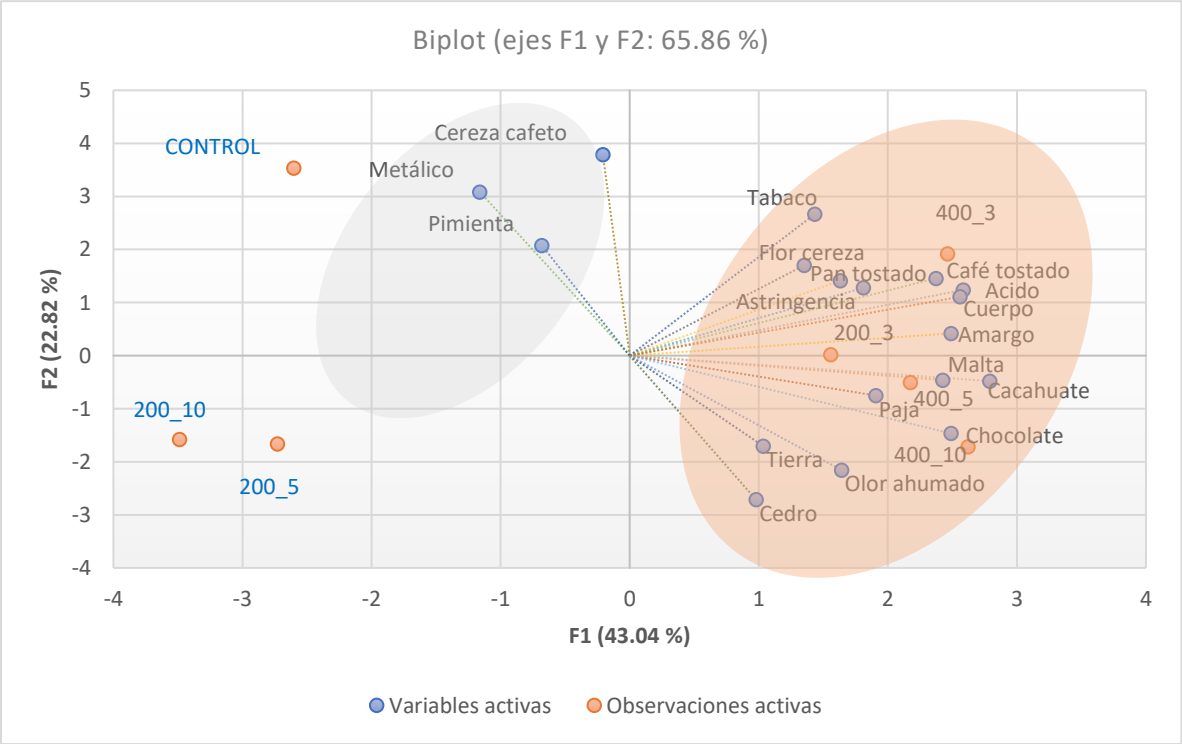


Figura 21. *Análisis de componentes principales para perfil sensorial de café con y sin tratamiento de PAPH.*

4.6.3 Temporal Dominance of Sensations (TDS)

La varianza de la tasa de dominancia de todos los términos sensoriales evaluados se calculó cada 5 s y se representó en un gráfico de tiempo estandarizado (eje x) vs tasa de dominancia (eje y) (***Figura 22***). Los términos sensoriales dominantes identificados en las bebidas de café fueron: amargor, acidez, notas a café, ácido, notas especiadas, notas cálidas, astringencia y *off-notes*. En el control, la primera característica dominante fue la acidez, seguida de *off-notes* (***Figura 22a***). En la muestra tratada a 200 MPa, 3 min, el descriptor dominante fue la nota a café, presente al inicio y nuevamente hacia el final de la degustación; en la parte media se identificaron los atributos amargo y ácido (***Figura 22b***). Por su parte, en la muestra tratada a 200 MPa, 5 min, las notas a café dom4naron al inicio, seguidas por astringencia y acidez en la parte media, y amargor al final (***Figura 22c***); finalmente, las características dominantes para aquella procesada a 200 MPa, 10 min fueron notas a café y amargor al inicio, seguidas de acidez, la cual persistió hasta la mitad de la degustación (***Figura 22d***). Mientras tanto, con las muestras provenientes del PAPH a 400 MPa, para aquella tratada por 3 min, la primera sensación detectada fue el amargor, seguida de notas a café y notas especiadas, finalizando con acidez (***Figura 22e***), mientras que con la tratada por 5 min, las primeras sensaciones dominantes fueron notas a café y frutos secos; posteriormente predominó la acidez y, hacia el final, notas a frutos secos y amargor (***Figura 22f***). Finalmente, en la bebida tratada por 10 min se detectó inicialmente amargor y notas cálidas de baja persistencia, seguidas de una prolongada presencia de nota a café, y al final una nueva aparición de notas cálidas junto con acidez (***Figura 22g***).

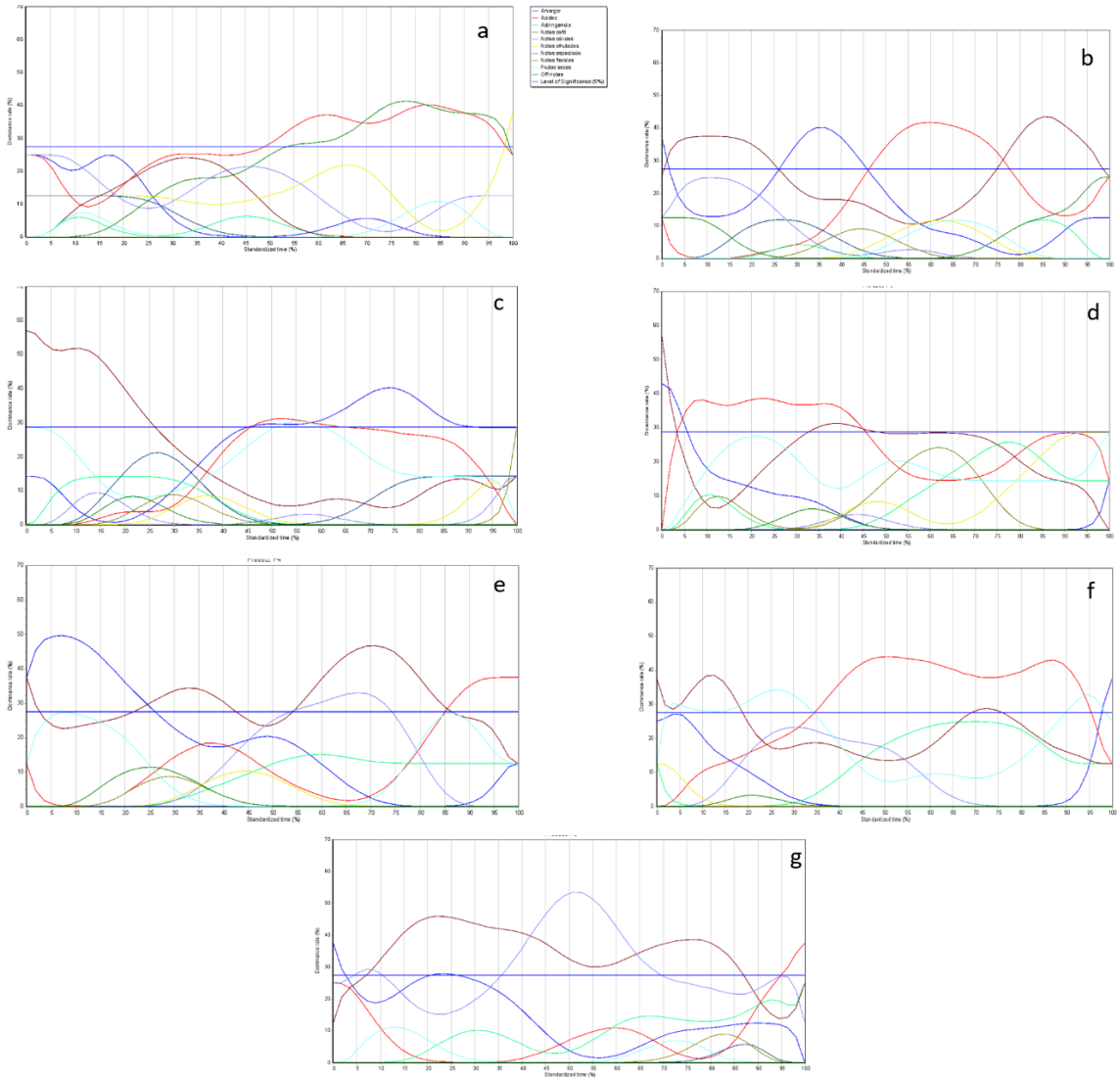


Figura 22. *Prueba TDS de muestras de bebida de café PAPH*
a)Control b)200-3 c)200-5 d)200-10 e)400-3 f)400-5 g)400-10

El café arábica se caracteriza por su acidez, la cual puede incrementarse por factores como la altitud de cultivo, la presencia de ácidos orgánicos (principalmente clorogénicos) y por beneficiado natural, donde el secado del grano con el mucílago intacto favorece una fermentación más prolongada y lenta. En todas las muestras se observó la acidez como característica dominante; sin embargo, los tratamientos a 200 MPa por 5 y 10 min y a 400 MPa por 10 min mostraron una reducción de este atributo, mientras que el tratamiento 200 MPa, 3 min lo mantuvo y los tratamientos a 400 MPa por 3 y 5 min tendieron a aumentarlo. Esto sugiere que la interacción presión-tiempo puede modular la liberación, transformación o retención de ácidos orgánicos y compuestos volátiles, influyendo así en la percepción sensorial. Un aspecto relevante es la presencia de *off-notes*, que pueden incluir matices metálicos, terrosos, a paja, astringentes

excesivos o ácido acético fuerte. Estas notas estuvieron presentes en el control, pero no se detectaron en las muestras tratadas con PAPH, lo cual indica un efecto positivo del tratamiento. En cuanto a la astringencia, se observó únicamente en el control y en las muestras tratadas a 200 y 400 MPa por 5 min. La PAPH podría reducir las *off-notes* debido a modificaciones estructurales que favorecen la liberación de volátiles indeseables mediante la ruptura de la matriz celular, así como a la transformación química de compuestos no deseados (como aldehídos o fenoles) y la eliminación de microorganismos productores de compuestos volátiles negativos, tales como ácido acético o compuestos sulfurosos. Asimismo, el descriptor notas a café apareció en todas las muestras tratadas con PAPH, a excepción del control, lo que sugiere que los tratamientos podrían intensificar esta nota característica. En cuanto al amargor, los tratamientos 200 MPa y 400 MPa por 3 min presentaron la mayor dominancia, en concordancia con el perfil sensorial, donde estos tratamientos mostraron un incremento significativo del amargor. Esto podría deberse a la liberación de compuestos como cafeína, trigonelina o ácidos clorogénicos desde la matriz celular por efecto de la presión. En cambio, los tratamientos de 5 y 10 min no mostraron incremento del amargor, posiblemente por la liberación de compuestos que lo enmascaran (como melanoidinas o azúcares) o por la transformación de sustancias amargas durante tiempos prolongados de tratamiento, reduciendo su intensidad. En conjunto, estos resultados sugieren que el tratamiento con PAPH puede mejorar atributos sensoriales positivos (como las notas a café) y reducir atributos indeseables (como las *off-notes*), probablemente debido a modificaciones en la matriz celular y a la liberación selectiva de compuestos volátiles (Martínez et al., 2022; Oey et al., 2018; Balasubramaniam, Barbosa-Cánovas & Lelieveld, 2016; Lee et al., 2015; Butz & Tauscher, 2002; Flament, 2001).

De manera complementaria, para correlacionarlos con pruebas sensoriales, se obtuvieron datos fisicoquímicos de café en taza, los cuales se presentan en la ***Tabla 16***. Los valores de pH fueron similares a los reportados por Rao y Fuller (2018) en bebidas elaboradas con granos de café de distintos orígenes. La relación entre los valores de pH y acidez titulable ha sido ampliamente estudiada para determinar su correspondencia con la acidez percibida en taza; en este sentido, Bähre et al. (2016) demostraron que la acidez titulable presenta una mejor correlación con la acidez sensorial que el valor de pH. De manera similar, Maier et al. (2019) observaron que la acidez del café se correlaciona de forma consistente con el valor de acidez titulable medido al pH de referencia. Por otro lado, los valores de °Brix obtenidos se encontraron por debajo de los reportados para cafés preparados mediante métodos de especialidad, lo cual puede atribuirse a que estos emplean moliendas más finas que las utilizadas en la cata de cafés, lo que incrementa la extracción de sólidos solubles durante la preparación.

Tabla 16. *pH, °Brix y acidez titulable de bebida de café pretratada de PAPH*

Presión (MPa)	pH			Brix			Acidez		
	t (min)			t (min)			t (min)		
	3	5	10	3	5	10	3	5	10
200	5.46±0.36 ^{Ba}	6.02±0.02^{B} $_{b}$	6.29±0.23^{Ab}	0.98±0.05^{Bb}	0.6±0.00 $_{Ba}$	0.65±0.06^{Aa}	6.40±0.18^{A} $_{b}$	6.18±0.13^{A} $_{a}$	6.01±0.01^{Aa}
400	4.82±0.15^{Aa}	4.67±0.16^{A} $_{a}$	6.34±0.13^{Ab}	0.58±0.05^{Aa}	0.55±0.06^{Aa}	1±0^{Bb}	6.84±0.05^{B} $_{c}$	6.57±0.05^{B} $_{b}$	6.01±0.02^{Aa}

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

4.7 Identificación de compuestos aromáticos de café con cromatografía de gases acoplada a masas (GC-MS).

En la ***Tabla 17*** se reportan el número de compuestos por grupo de familias aromáticas encontrados en el café tostado con y sin tratamiento de PAPH resultado del análisis de GC/MS. Los compuestos volátiles producidos en el café son resultado de procesos químicos que se desarrollan durante el proceso de tostado, dentro de los cuales los más importantes son los furanos, pirazinas, piridinas, pirroles y en menor importancia se encuentran los ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, compuestos azufrados, entre otros (Sunarharum, Williams. &; Illy., 2004; Buffo & Cardelli-Freire, 2004).

Considerando la complejidad de la información presentada en la Tabla 16, se optó por realizar un análisis de componentes principales (PCA) para intentar revelara patrones que permitiesen valorar posibles diferencias aromáticas entre las muestras. En la ***Figura 23*** se presenta el análisis de componentes principales (PCA) correspondiente a los compuestos volátiles del café con y sin tratamiento de PAPH. El modelo explica el 61.52% de la variabilidad total de los datos, donde el componente F1 aporta el 37.40% y el F2 el 24.12%.

El componente F1 agrupa principalmente a la muestra control y a los tratamientos de 200 MPa por 3 y 5 minutos, asociados con las familias químicas de ácidos, cetonas, lactonas, terpenos, pirroles, alcoholes, fenoles y compuestos aromáticos heterocíclicos. Estos resultados sugieren que tanto el control como los tratamientos a 200 MPa conservan compuestos característicos del grano verde y precursores aromáticos poco modificados, posiblemente porque dicha presión no es suficiente para inducir cambios significativos en el perfil volátil. En consecuencia, se puede relacionar esta agrupación con una mayor percepción de notas ácidas, florales y frutales, atribuibles a la mayor presencia de compuestos ácidos.

Tabla 17. *Número de compuestos volátiles por familia química aromática.*

		200 MPa			400 MPa		
Compuestos	**Control**	**3 min**	**5 min**	**10 min**	**3 min**	**5 min**	**10 min**
Aldehídos	8	9	9	10	11	10	10
Ácidos	8	8	7	9	7	6	6
Esteres	9	7	7	6	3	3	3
Furanos	9	8	7	6	5	6	6
Azufrados	0	2	1	3	1	2	0
Tioles	1	1	1	1	1	1	1
Furanonas	1	1	1	1	1	1	1
Tiazoles	0	0	1	1	0	0	1
Cetonas	13	11	10	10	11	10	11
Fenoles	6	6	6	6	6	6	6
Pirazinas	14	16	14	16	16	16	17
Piridinas	3	5	4	4	4	3	3
Pirroles	6	6	6	5	6	6	6
Alcoholes	3	3	3	3	3	3	3
Fufurales	1	2	2	2	3	2	2
Comp nitrogenados	1	1	1	1	1	1	1
,Taninos	1	1	1	1	1	1	1
Terpenos	3	3	2	2	3	2	2
Ciclopentenonas	1	1	1	1	1	1	1
Lactonas cíclicas	1	1	2	1	1	1	1
Dienos	1	1	1	0	0	0	0
Heterocíclico aromático	1	1	1	1	1	1	1
Lactama heterocíclica	0	0	1	0	0	0	0
Aminas aromáticas	0	0	1	0	0	0	0
Benzopironas	0	0	0	0	0	1	1

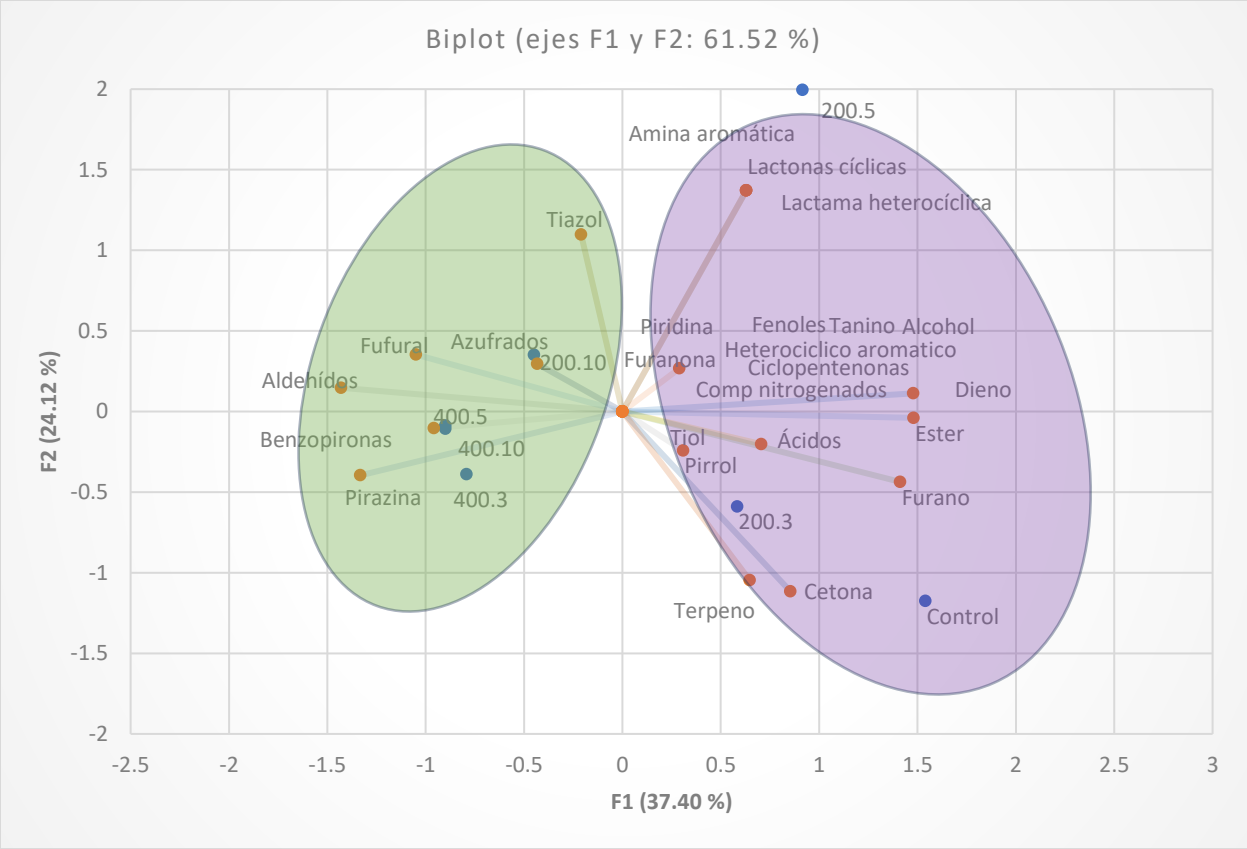


***Figura 23**. Análisis de componentes principales para los compuestos volátiles de café con y sin tratamiento de PAPH*

Por otro lado, el componente F2 agrupa los tratamientos de 200 MPa por 10 min y de 400 MPa (3, 5 y 10 min), donde predominan las familias de aldehídos, compuestos azufrados, pirazinas, benzopiranonas, furanos, furfural y tiazoles. Estos resultados indican que el tratamiento con PAPH favorece la formación de compuestos derivados de reacciones de Maillard (como pirazinas y furanos), así como productos de degradación térmica o estructural que no se observan o se encuentran en bajas concentraciones en la muestra control. La presencia de compuestos azufrados también sugiere la generación de aromas más intensos y tostados.

En conjunto, los resultados evidencian que el tratamiento con PAPH puede modular el perfil aromático del café, incrementando o reduciendo familias específicas de compuestos volátiles. Los tratamientos a 400 MPa generan un perfil más tostado y complejo, característico de los cafés de especialidad, mientras que los tratamientos a 200 MPa preservan un perfil más natural y menos modificado del grano original (Laukaleja & Kruma, 2019; Toledo, Pezza & Toci, 2016; Sunarharum, Williams & Smyth, 2014; Gloess, 2013; Buffo & Cardelli-Freire, 2004; Yeretzian et al., 2002).

4.8 Detección de trigonelina, cafeína y ácido clorogénico por HPLC

Se obtuvieron las curvas de calibración para los estándares de ácido clorogénico, cafeína y trigonelina donde se obtuvo una R^2 de 0.98 , 0.9995 y 0.997 respectivamente, como se muestra en la ***Figura 24***; con las ecuaciones obtenidas se pudieron calcular los datos de concentración de los compuestos mencionados.

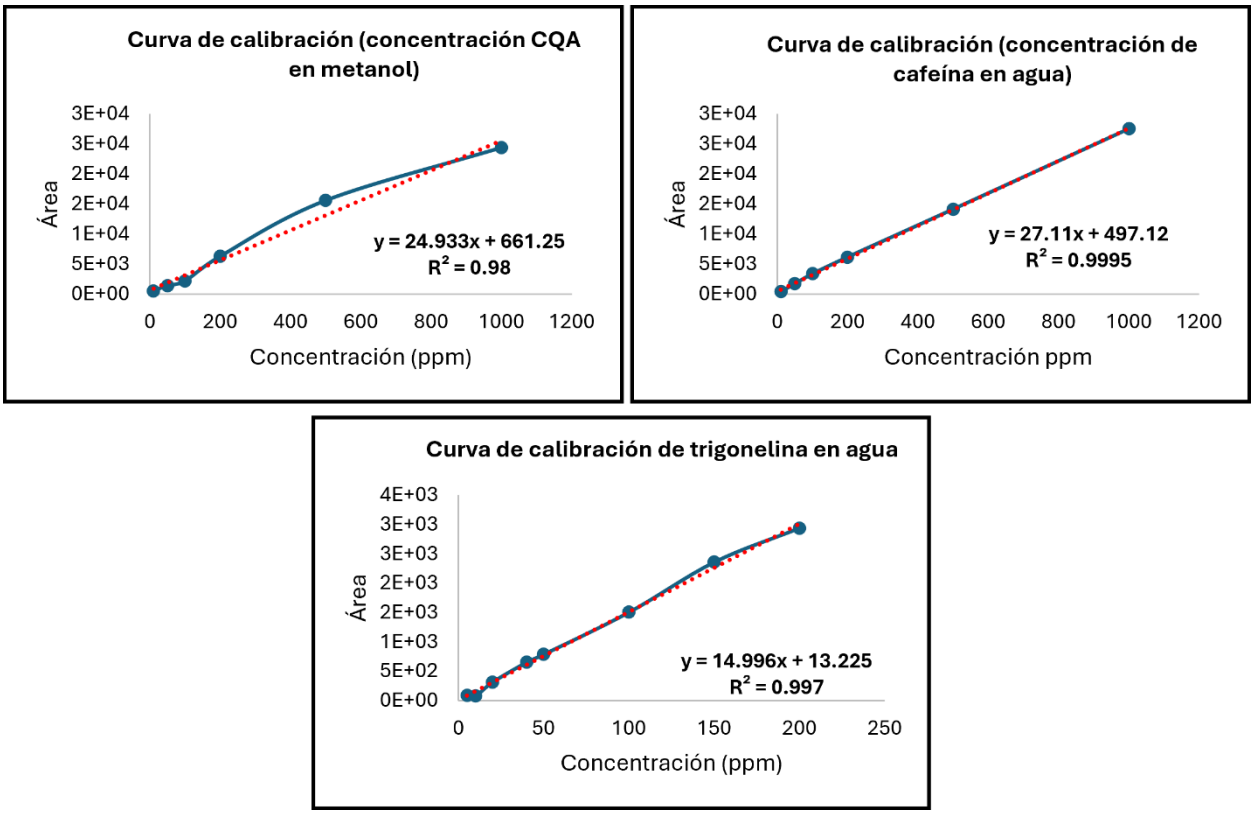


Figura 24. *Curvas de calibración para cafeína trigonelina y ácido clorogénico*

Las concentraciones de cafeína, trigonelina y CQA se muestran en mg/L en la ***Tabla 18***. Se puede observar que el tratamiento de 400 MPa a 3, 5 y 10 min aumentó considerablemente la concentración de los tres compuestos con relación al control; algunos autores hacen mención del incremento de la capacidad antioxidante de puré de fresa y hojas de ortiga tratados por PAPH a 600MPa/15 min y 200 MPa a 10.2-15.6 min (Escobedo et al., 2011; Pinto et al., 2022 y Moreira et al., 2020). Por otra parte, se ha identificado que diferentes vegetales y frutas tratados por PAPH han mostrado un incremento en los compuestos fenólicos, lo cual se ha asociado a la ruptura de tejidos celulares que facilita su extracción; en este sentido, la aplicación de PAPH a 100, 125, 150, 175 y 200 MPa por 10 min en papa generaron un incremento de 54, 81, 267, 456 y 453% en la concentración de bioactivos, esto se asoció a la pérdida de compartimentación y

liberación del contenido de vacuolas en el citoplasma. De manera similar, el análisis de catequina, ácido clorogénico, ferúlico, cafeico y p-cumárico en jugo de albaricoque evidenció un incremento al aplicar una presión de 300-500 MPa durante 5-20 min. Alternativamente se ha propuesto que el PAPH puede funcionar como un factor abiótico, activando la ruta biosintética encargada de producirlos, manteniendo la integridad celular en determinadas condiciones de presión/tiempo, reteniendo así su actividad enzimática para inducir la producción de fenoles (Navarro Baez et al., 2022; Okur et al., 2019; Vargas et al, 2013). En un estudio donde se aplicaron PAPH a 60 y 100 MPa en zanahoria se obtuvo un incremento en el contenido fenólico de 69.1 y 154.9% respectivamente después de un día de almacenamiento. Con estos resultados se puede evidenciar que el factor mecánico de estrés muestra un efecto positivo en la producción de compuestos fenólicos en el material vegetal.

Tabla 18. Concentración de cafeína, trigonelina y ácido clorogénico en extractos de café tratado por PAPH

Presión (MPa)/tiempo (Min)	CQA (mg/L)			Cafeína (mg/L)		
	3	5	10	3	5	10
200	538.53±0.00 ^{Ab}	463.25±0.01^{Bb}	545.65±0.00^{Ab}	273.37±0.09^{Ab}	242.23±0.00^{Bb}	278.23±0.17^{Ab}
400	615.07±0.01 ^{Aa}	701.22±0.00^{Ba}	597.99±0.00 ^{Aa}	301.38±0.00^{Ba}	336.18±0.00^{Aa}	309.02±0.00^{Ba}

Presión (MPa)/tiempo (Min)	Trigonelina (mg/L)		
	3	5	10
200	238.2±0.02^{Ab}	148.68±0.01^{Bb}	233.44±0.05^{Ab}
400	259.73±0.04^{Ba}	294.44±0.00^{Aa}	286.29±0.01^{Aa}

Control (CQA 579 ± 0.00 mg/L, Cafeína 266.95 ± 0.09 mg/L, Trigonelina 187.22 ± 0.06 mg/L)

* Los resultados se expresan como el valor medio ± desviación estándar (n=3).

A Valores en columnas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

a Valores en filas con letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$)

En el café verde los compuestos con capacidad antioxidante son la cafeína, los ácidos fenólicos (acido cafeico y clorogénico), polifenoles y alcaloides como la trigonelina, durante el proceso de tostado estos pueden presentar una disminución ya sea porque se degradan en otros compuestos aromáticos como los pirroles y las pirazinas o porque como en el caso de los CQA participan en la reacción de Maillard formando melanoidinas, compuestos que también han evidenciado su capacidad antioxidante y quelante. (Aguayo-Muñoz et al., 2024 ;Pérez-Hernández et al., 2012). Estos compuestos bioactivos son importantes a nivel de salud ya que su consumo en cantidades previamente estudiadas da la pauta para enfocarlos a la prevención de enfermedades cardiovasculares e inflamatorias; por lo tanto es necesario seguir estudiando

la aplicación de un tratamiento de PAPH con la finalidad de realizar análisis de capacidad antioxidante y de esta forma poder enfocarlo a un segmento que requiere de consumo de estos compuestos (Wei & Tanokura, 2015).

4.9 Identificación de cambios aromáticos con equipo CVC

Los datos obtenidos para cada muestra se analizaron por duplicado. A partir de estos registros se generaron curvas individuales para cada sensor, lo que permitió observar el comportamiento característico de las muestras. En los gráficos se representa la variación del voltaje en función del tiempo, reflejando los cambios en la resistencia eléctrica provocados por la presencia de compuestos volátiles. En las gráficas pueden distinguirse tres etapas principales:

a) Etapa inicial (0–5 min): corresponde al registro de voltaje asociado a la detección del aire de referencia dentro de la cámara.
b) Etapa ascendente (5–35 min): en este intervalo la cámara se encuentra ya saturada por los compuestos volátiles emitidos por las muestras, y los sensores registran las variaciones de voltaje debidas a su detección.
c) Etapa de aire (35–40 min): se observa una disminución en el voltaje, indicando que la concentración de volátiles provenientes de la muestra ha disminuido.

Se seleccionaron sólo cuatro sensores (MQ3, MQ4, MQ8 y MQ135) cuyos registros no presentaron interferencias significativas por ruido, el cual suele deberse a problemas de sensibilidad y se manifiesta como una saturación temprana de la señal. En las curvas obtenidas con estos sensores se observó que la detección de volátiles siguió el orden: 200-3 > 200-5 > 200-10, ubicándose por encima de las muestras tratadas a 400 MPa (3, 5 y 10 min) y del control. Esta tendencia puede visualizarse en las figuras correspondientes.

Al relacionar estos resultados con los gráficos de TDS mostrados en la ***Figura 22***, se aprecia que los tratamientos a 200 MPa se asocian con una detección predominante de notas a café, acidez y amargor, mientras que en el control y los tratamientos a 400 MPa, las primeras características sensoriales detectadas son amargor, notas cálidas, notas a café y acidez. Esto sugiere que el sistema de sensores logró discriminar cualitativamente entre los distintos pretratamientos aplicados al café cereza, generando un patrón de respuesta característico para cada condición. Los sensores empleados presentan diferentes especificidades: MQ3 (alcoholes), MQ4 (metano y gas natural), MQ8 (hidrógeno) y MQ135 (alcohol, benceno y dióxido de carbono). Durante el proceso de tostado, los precursores de sabor como la cafeína, trigonelina y los ácidos clorogénicos (CQA) se transforman en compuestos como pirazinas, piridinas, guayacol, pirogalol,

pirrol, catecol y ácido nicotínico, los cuales contribuyen a las notas de amargor, acidez y aroma característico a café observadas en los tratamientos de 200 MPa por 3, 5 y 10 minutos. Al analizar las estructuras químicas de estos compuestos, se observa que sus grupos funcionales coinciden con los tipos de volátiles detectados por los sensores empleados en la cámara CVC (***Figura 25***).

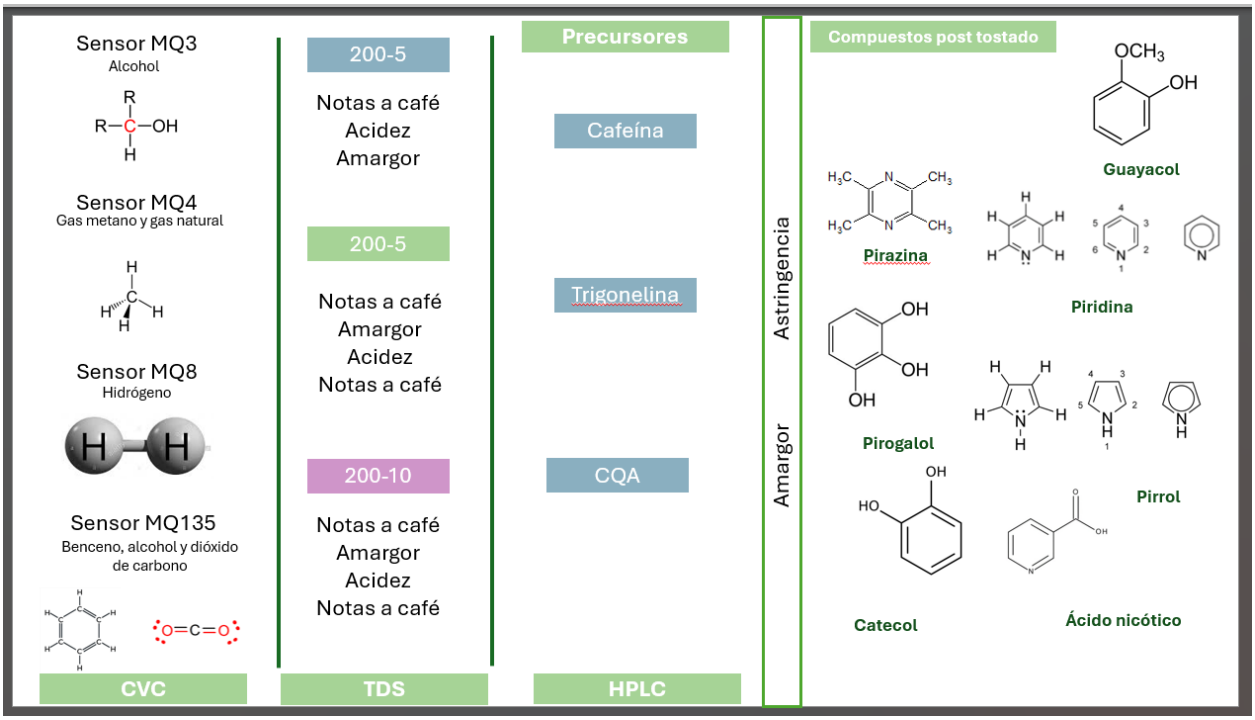


Figura 25. *Relación entre los compuestos volátiles generados a partir de precursores químicos en café verde identificados con la cámara CVC*

Fuente: propia.

V. Conclusiones

- Se pudo observar la eliminación de coliformes totales en todos los tratamientos de PAPH, para BMA y BAL se observó una disminución significativa en el tratamiento 400 MPa en comparación con el de 200MPA y por último para H y L se observó una disminución significativa en el tratamiento de 200 M Pa (3 y 10 min) y 400 MPa (5 min), esto sugiere una modulación de la microbiota presente en café después del tratamiento de PAPH, pero se requiere hacer la identificación por PCR de los microorganismos presentes para saber si los que se mantienen son de importancia para el proceso fermentativo.
- Se observaron diferencias en las características fisicoquímicas entre las muestras con y sin tratamiento, pudiendo notar que la Luminosidad tuvo un incremento en todos los tratamientos, el valor de a mostró una disminución significativa en el color rojo en los tratamientos de 10 minutos y el valor de b mostró un incremento significativo en los tratamientos; en cuanto al pH se observó un aumento significativo en 200 y 400 MPa (3 y 10 min), mientras que la acidez mostró disminución significativa; el valor de grados brix disminuyó de forma general en todos los tratamientos, resultado de la ruptura celular y liberación de azúcares solubles, que a su vez sugieren un aumento en azúcares reductores en todos los tratamientos evaluados contra el control.
- Se demostró que mediante la aplicación de alta presión aumentó significativamente la concentración precursores de sabor en los extractos de café (CQA, trigonelina y cafeína) en los tratamientos de 400MPa (3,5 y 10 min).
- Se pudo definir las características sensoriales en las muestras de café, formando tres grupos: grupo 1 (control), grupo 2 (400MPa 3,5 y 10 min y 200 MPa 3min), grupo 3 (200 MPa 5 y 10 min), logrando observar perfiles muy diferentes donde el grupo 2 presentó una variedad más amplia de descriptores.
- Después del análisis de cromatografía acoplado a masas se sugiere que el tratamiento de PAPH puede mejorar atributos sensoriales deseables y reducir otros indeseables como las off notes (metálico, astringente, tierra y paja), debido posiblemente a la modificación de la matriz celular del fruto y la modulación de la carga microbiana en la cereza de café.
- Se verificó que el equipo CVC es sensible para determinar los cambios en la identificación de compuestos volátiles entre los distintos tratamientos de PAPH aplicados; pero se sugiere realizar un análisis posterior donde se identifiquen específicamente los compuestos presentes sensibles para determinar los cambios entre tratamientos.

VI. Trabajo a futuro

- Seleccionar los mejores tiempos y presión de tratamiento en la cereza de café de acuerdo con los resultados obtenidos.
- Evaluar características fisicoquímicas en diferentes puntos del proceso de fermentación.
- Realizar un PCR en la cereza de café posterior a la aplicación de tratamientos de PAPH.
- Simular condiciones de secado en el laboratorio para monitorear detalladamente mediciones de Aw y de porcentaje de humedad.
- Probar este tecnología en café robusta para conocer los perfiles sensoriales que se pueden obtener en esta variedad.
- Probar con otras tecnologías emergentes la modulación de carga microbiana y la expresión de compuestos precursores y volátiles.

VII. Referencias

Abera, G. (2019). Review on high-pressure processing of foods. *Cogent food & agriculture*, *5*(1), 1568725. https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1568725

Aguayo-Muñoz, M. M., Guadarrama-Lezama, A. Y., Pérez-Alonso, C., & Cruz-Olivares, J. (2024). Evaluation of the Antioxidant Capacity of Deep-frozen Green Coffee and Roasted Coffee. *Ciencia Tecnologia Agropecuaria*, *25*(2). https://doi.org/10.21930/rcta.vol25_num2_art:3357

Álvarez Andrade, A. D. (2025). *"Evaluación productiva y organolépticas de tres genotipos de café Arábigo en tres tipos de beneficios"*. Tesis de Licenciatura. UNESUM, Ecuador. http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/8000

Arcila-Pulgarín, J., Buhr, L., Bleiholder, H., Hack, H., Meier, U., & Wicke, H. (2002). Application of the extended BBCH scale for the description of the growth stages of coffee (Coffea spp.). Annals of Applied Biology, 141(1), 19–27. https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2002.tb00191.x

Arismendy, J. H. (2015). *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza*. Universidad Nacional de Colombia.

Aswathi, K. N., & Murthy, P. S. (2024). Pulped natural/honey coffee process: An innovative approach. *Food and Humanity*, *2*, 100287. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100287

Awwad, S., Issa, R., Alnsour, L., Albals, D., & Al-Momani, I. (2021). Quantification of caffeine and chlorogenic acid in green and roasted coffee samples using hplc-dad and evaluation of the effect of degree of roasting on their levels. Molecules, 26(24), 7502. https://doi.org/10.3390/molecules26247502

Balasubramaniam, V. M., Barbosa-Cánovas, G. V., & Lelieveld, H. (Eds.). (2016). *High pressure processing of food: Principles, technology and applications*. Springer. https://10.1146/annurev-food-022814-015539

Balasubramaniam, V. M., Martinez-Monteagudo, S. I., & Gupta, R. (2015). Principles and application of high pressure–based technologies in the food industry. *Annual review of food science and technology*, *6*(1), 435-462. https://doi.org/10.1146/annurev-food-022814-015539

Barba, F. J., Esteve, M. J., & Frígola, A. (2012). High pressure treatment effect on physicochemical and nutritional properties of fluid foods during storage: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *11*(3), 307-322. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2012.00185.x

Barbosa, M. de S. G., Francisco, J. S., dos Santos Scholz, M. B., Kitzberger, C. S. G., & Benassi, M. de T. (2019). Dynamics of sensory perceptions in arabica coffee brews with different roasting degrees. Journal of Culinary Science and Technology, 17(5), 453–464. https://doi.org/10.1080/15428052.2018.1489321

Bastian, F., Hutabarat, O. S., Dirpan, A., Nainu, F., Harapan, H., Emran, T. B., & Simal-Gandara, J. (2021). From plantation to cup: Changes in bioactive compounds during coffee processing. *Foods*, *10*(11), 2827. https://doi.org/10.3390/foods10112827

Batista, L. R., Souza, S. M. C. de, Batista, C. F. S., & Schwan, R. F. (2016). Coffee: Types and Production. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), Encyclopedia of Food and Health (pp. 244–251). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00184-7

Benitez – Urbano, O.J. & Campos - Ceballos, D.A. (2018). Evaluación de la calidad el café tostado utilizando herramientas de procesamiento digital de imágenes. *REVISTA ACCB*, *1*(30), 32-43. https://revistaaccb.org/r/index.php/accb/article/view/153

Bertrand, B., Boulanger, R., Dussert, S., Ribeyre, F., Berthiot, L., Descroix, F., & Joët, T. (2012). Climatic factors directly impact the volatile organic compound fingerprint in green Arabica coffee bean as well as coffee beverage quality. *Food chemistry*, *135*(4), 2575-2583. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.06.060

Borrella, I., Mataix, C., & Carrasco-Gallego, R. (2015). Smallholder farmers in the speciality coffee industry: opportunities, constraints and the businesses that are making it possible. *IDS bulletin*, *46*(3), 29-44. https://doi.org/10.1111/1759-5436.12147

Bressani, A. P. P., Martinez, S. J., Batista, N. N., Simão, J. B. P., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2021). Co-inoculation of yeasts starters: A strategy to improve quality of low altitude Arabica coffee. *Food chemistry*, *361*, 130133.. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130133

Brioschi Junior, D., Carvalho Guarçoni, R., de Cassia Soares da Silva, M., Gomes Reis Veloso, T., Catarina Megumi Kasuya, M., Catarina da Silva Oliveira, E., ... & Pereira, L. L. (2021). Microbial fermentation affects sensorial, chemical, and microbial profile of coffee under carbonic maceration. *Food chemistry*, *342*, 128296. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128296

Buffo, R. A., & Cardelli-Freire, C. (2004). Coffee flavour: an overview. *Flavour and fragrance journal*, *19*(2), 99-104. https://doi.org/10.1002/ffj.1325

Butz, P., & Tauscher, B. (2002). Emerging technologies: chemical aspects. *Food research international*, *35*(2-3), 279-284. https://doi.org/10.1016/S0963-9969(01)00179-X

Buzrul, S. (2012). High hydrostatic pressure treatment of beer and wine: A review. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *13*, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.10.001

Caballero-Figueroa, E., Terrés, E., Hernández-Hernández, H. M., & Escamilla-García, M. (2022). Revisión sobre las tecnologías emergentes no térmicas para el procesamiento de alimentos. *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, *25*.https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2022.459

Cajiao, A. P. (2017). Aislamiento de hongos asociados al grano de café provenientes de zonas productoras en Norte de Santander-Colombia. @ *limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, *14*(1), 49-57. 10.24054/16927125.v1.n1.2016.2125

Carvajal Herrera, J. J., Aristizábal Torres, I. D., Oliveros Tascón, C. E., & Mejía Montoya, J. W. (2011). Colorimetría del Fruto de Café (Coffea arabica L.) Durante su Desarrollo y Maduración. *Revista Facultad Nacional de Agronomía - Medellín*, 64(2), 6229-6240. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0304-28472011000200020&script=sci_arttext

Cerny, C., Schlichtherle-Cerny, H., Gibe, R., & Yuan, Y. (2021). Furfuryl alcohol is a precursor for furfurylthiol in coffee. *Food Chemistry*, *337*, 128008. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128008

Chen, D., Pan, S., Chen, J., Pang, X., Guo, X., Gao, L., ... & Wu, J. (2016). Comparing the effects of high hydrostatic pressure and ultrahigh temperature on quality and shelf life of cloudy ginger juice. *Food and Bioprocess Technology*, *9*(10), 1779-1793.https://doi.org/10.1007/s11947-016-1759-1

Coa Urbaez, M., Silva-Acuña, R., Méndez Natera, J. R., & Mundarain Padilla, S. (2015). Fenología de la floración del cafeto var. Catuaí Rojo en el municipio Caripe del estado Monagas, Venezuela. *Idesia (Arica)*, *33*(1), 59-67. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000100007.

Collazos-Escobar, G. A., Gutiérrez-Guzmán, N., & Váquiro-Herrera, H. A. (2019). Modeling dynamic adsorption isotherms and thermodynamic properties of specialty ground roasted-coffee (Coffea arabica L.) 14(1), 93–101. https://doi.org/10.25186/cs.v14i1.1532

Consejo Salvadoreño del Café (CSC), Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), & Unión Europea (UE). (2019). Guía Práctica de Caficultura. Obtenido de: https://hdl.handle.net/11324/13191

Cordoba, N., Fernandez-Alduenda, M., Moreno, F. L., & Ruiz, Y. (2020). Coffee extraction: A review of parameters and their influence on the physicochemical characteristics and flavour of coffee brews. *Trends in Food Science & Technology*, *96*, 45-60. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.12.004

Cruz-O'Byrne, R., Piraneque-Gambasica, N., & Aguirre-Forero, S. (2020). Physicochemical, microbiological, and sensory analysis of fermented coffee from Sierra Nevada of Santa Marta, Colombia. https://doi.org/10.25186/.V15I.1797

da Silva Vale, A., Balla, G., Rodrigues, L. R. S., de Carvalho Neto, D. P., Soccol, C. R., & de Melo Pereira, G. V. (2022). Understanding the effects of self-induced anaerobic fermentation on coffee beans quality: Microbiological, metabolic, and sensory studies. *Foods*, *12*(1), 37. https://doi.org/10.3390/foods12061206

De Bruyn, F., Zhang, S. J., Pothakos, V., Torres, J., Lambot, C., Moroni, A. V., ... & 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

de Carvalho Neto, D. P., de Melo Pereira, G. V., Finco, A. M., Letti, L. A., da Silva, B. J., Vandenberghe, L. P., & Soccol, C. R. (2018). Efficient coffee beans mucilage layer removal using lactic acid fermentation in a stirred-tank bioreactor: Kinetic, metabolic and sensorial studies. *Food Bioscience*, *26*, 80-87. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2018.10.005

de Melo Pereira, G. V., da Silva Vale, A., de Carvalho Neto, 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 Oliveira Junqueira, A. C., de Melo Pereira, G. V., Coral Medina, J. D., Alvear, M. C., Rosero, R., de Carvalho Neto, D. P., ... & Soccol, C. R. (2019). First description of bacterial and fungal communities in Colombian coffee beans fermentation analysed using Illumina-based amplicon sequencing. *Scientific Reports*, *9*(1), 8794. https://doi.org/10.1038/s41598-019-45002-8

Demarinis, C., Verni, M., Pinto, L., Rizzello, C. G., & Baruzzi, F. (2022). Use of selected lactic acid bacteria for the fermentation of legume-based water extracts. *Foods*, *11*(21), 3346. https://doi.org/10.3390/foods11213346

Denoya, G. I., Fernández, M. V., Sanow, L. C., Bello, F., Jagus, R. J., Vaudagna, S. R., & Agüero, M. V. (2017). Revalorización de subproductos hortícolas: desarrollo de un batido mezcla de frutas y verduras estabilizado con altas presiones hidrostáticas. I Congreso Argentino de Biología y Tecnología Poscosecha. *Concordia, Argentina (October 25-27)*. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.02.011

Descroix, F., & Snoeck, J. (2009). Environmental factors suitable for coffee cultivation. In J. N. Wintgens (Ed.), *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production* (2nd ed., pp. 164–177). Wiley-VCH. https://doi.org/10.1002/9783527619627

Dhenge, R., Rinaldi, M., Rodolfi, M., Barbanti, D., & Ganino, T. (2023). Modification of structural characteristics of vegetables by high-pressure processing: A review. In Food Bioscience (Vol. 56). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103407

Dhenge, R., Rinaldi, M., Rodolfi, M., Barbanti, D., & Ganino, T. (2023). Modification of structural characteristics of vegetables by high-pressure processing: A review. *Food Bioscience*, *56*, 103407.. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103407

Díaz, F. O., Ormaza, A. M., & Rojano, B. A. (2018). Efecto de la tostión del café (Coffea arabica L. var. Castillo) sobre el perfil de taza, contenido de compuestos antioxidantes y la actividad antioxidante. *Información tecnológica*, *29*(4), 31-42. https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000400031

Diaz-Noguera, A.L., Perdomo-Reyes, A. M., (2015). Caracterización físico-química y sensorial de dos variedades de café (Coffea arabica) del occidente de Honduras. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/68f65fef-2b8c-4699-8352-b65e4676b232/content

Dong, R., Zhu, M., Long, Y., Yu, Q., Li, C., Xie, J., ... & Chen, Y. (2023). Exploring correlations between green coffee bean components and thermal contaminants in roasted coffee beans. *Food Research International*, *167*,112700. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112700

Duarte, G. S., Pereira, A. A., & Farah, A. (2010). Chlorogenic acids and other relevant compounds in Brazilian coffees processed by semi-dry and wet post-harvesting methods. *Food Chemistry*, *118*(3), 851-855. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.042

Echeverri, L. F., & Osorio, V. (2024). Compuestos del grano de cafÃ© verde que determinan la acidez de la bebida. *Avances Técnicos Cenicafé*, 1-8. https://doi.org/10.38141/10779/0565

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

Escobedo-Avellaneda, Z., Moure, M. P., Chotyakul, N., Torres, J. A., Welti-Chanes, J., & Lamela, C. P. (2011). Benefits and limitations of food processing by high-pressure technologies: effects on functional compounds and abiotic contaminants Beneficios y limitaciones del

procesamiento de alimentos por tecnologías de alta presión: efectos en componentes funcionales y contaminantes abióticos. *CyTa-journal of food*, *9*(4), 351-364. https://doi.org/10.1080/19476337.2011.616959

Evangelista, S. R., Silva, C. F., da Cruz Miguel, M. G. P., de Souza Cordeiro, C., 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

Fachin, D., Smout, C., Verlent, I., Ly Nguyen, B., Van Loey, A. M., & Hendrickx, M. E. (2004). Inactivation kinetics of purified tomato polygalacturonase by thermal and high-pressure processing. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *52*(9), 2697-2703. https://doi.org/10.1021/jf030531h

Fantini, E., Gianese, G., Giuliano, G., & Fiore, A. (2015). Bacterial metabarcoding by 16S rRNA gene ion torrent amplicon sequencing. In *Bacterial Pangenomics: Methods and Protocols* (pp. 77-90). New York, NY: Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-1720-4_5

Farah, A., de Paulis, T., Trugo, L. C., & Martin, P. R. (2005). Effect of roasting on the formation of chlorogenic acid lactones in coffee. *Journal of agricultural and food chemistry*, *53*(5), 1505-1513. https://doi.org/10.1021/jf048701t

Febrianto, N. A., & Zhu, F. (2023). Coffee bean processing: Emerging methods and their effects on chemical, biological and sensory properties. In Food Chemistry (Vol. 412). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135489

Fernández Ruano Marina, De Mateo Silleras Beatriz, & Martín Diana Ana Belén. (2020). Aplicación de altas presiones hidrostáticas en el desarrollo de un producto panificable con bajo índice glucémico y alta capacidad antioxidante. Universidad de Valladolid. https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/42380/TFG-M-N2046.pdf?sequence=1

Ferreira, L. J. C., de Souza Gomes, M., de Oliveira, L. M., & Santos, L. D. (2023). Coffee fermentation process: A review. *Food Research International*, *169*, 112793. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.112793

Figueiredo De Abreu, G., Dellyzete, S., Franco Da Rosa, V., Malta, M. R., Da Consolação, A., Clemente, S., Lima Vilela, A., & Pereira, R. W. (2018). Antioxidant enzymes preserving coffee quality in refrigerate environment. *Biotecnología vegetal de las plantas*. Vol. 18, No. 3:151-159. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/111762021/Antioxidant-enzymes-preserving-coffee-quality-libre.pdf?1708720758=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAntioxidant_enzymes_preserving_coffee_qu.pdf&Expires=1764617951&Signature=JL3HdbU4FjXUFSpnI10tyhnBhz3YQVUnxTvyxBDuzj~2AvyLhad3SzpnJKHZtojEWpAOQ3kawwZ8RIKu1ZJmMa4YubFr9Dsvj29a44gOi62JpfxCIk86FanwCw3SF-z6iru8uJh11iqc~8iHTx-uUIEzLzASA38f0OezB8RHr~orWN8vxHAcmFzdp~SbIHUoTGr4lOGT0M8Lcu2bGapMtPLHkYmsdp2u5D9~-aqIklArMcHGK0vI84J7RoYQkV7Jjk-2HCJJ1gG~gGBxDY-dyvuuQuElQIPNRrs2ofZnxzd8vUcrJuGt2GuoJqzw7rpgI4z2jGbJPZUcvMclRLYKGg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Flament, I. (2001). *Coffee flavor chemistry*. John Wiley & Sons. https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=NQi1LYJxFvUC&oi=fnd&pg=PP11&dq=Flament,+I.+(2001).+Coffee+flavor+chemistry.+John+Wiley+%26+Sons.&ots=dTQ9bb-0-

s&sig=LuZvvya9AoFLViE42GGoZDIOrxs&redir_esc=y#v=onepage&q=Flament%2C%20I.%20(2001).%20Coffee%20flavor%20chemistry.%20John%20Wiley%20%26%20Sons.&f=false

Flandez, L. E. L., Castillo-Israel, K. A. T., Rivadeneira, J. P., Tuaño, A. P. P., & Hizon-Fradejas, A. B. (2023). Development and validation of an HPLC-DAD method for the simultaneous analysis of phenolic compounds. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, *19*(5), 855-864. https://doi.org/10.11113/mjfas.v19n5.3049

Florez Arenas, A., Hincapie, A. M. V., & Ocampo, G. T. (2022). Effects of post-harvest process on volatile-sensory profile for coffee in Colombia. https://doi.org/10.25186/.v17i.2016

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

Gandul Rojas B. (1992). Degradación de clorofilas y carotenoides durante la elaboración de aceitunas verdes de mesa. [Tesis de Doctorado, Universidad de Sevilla]. https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=161428

García-García, Guerra, E.-, Sosa-Morales, Gómez-Salazar, & Cerón-García. (2019). Caracterización colorimétrica y propiedades fisicoquímicas en bebidas a base de café soluble. RESUMEN (Vol. 4). https://doi.org/10.1007/s00217-013-1917-x

Gloess, A. N., Schönbächler, B., Klopprogge, B., DAmbrosio, L., Chatelain, K., Bongartz, A., & Yeretzian, C. (2013). Comparison of nine common coffee extraction methods: instrumental and sensory analysis. *European Food Research and Technology*, *236*(4), 607-627. https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00217-013-1917-x.pdf

Gomes, W. D. S., Pereira, L. L., Filete, C. A., Moreira, T. R., Guarçoni, R. C., Catarina da Silva Oliveira, E., ... & Partelli, F. L. (2022). Changes in the chemical and sensory profile of coffea canephora var. conilon promoted by carbonic maceration. *Agronomy*, *12*(10), 2265. https://doi.org/10.3390/agronomy12102265

Goraya, R. K., Singla, M., Kaura, R., Singh, C. B., & Singh, A. (2024). Exploring the impact of high pressure processing on the characteristics of processed fruit and vegetable products: a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1-24. https://doi.org/10.1080/10408398.2024.2373390

Haile, M., & Kang, W. H. (2019). The role of microbes in coffee fermentation and their impact on coffee quality. *Journal of Food Quality*, *2019*(1), 4836709. https://doi.org/10.1155/2019/4836709

Hall, R. D., Twitgensrevisan, F., & de Vos, R. C. (2022). Coffee berry and green bean chemistry–Opportunities for improving cup quality and crop circularity. *Food Research International*, *151*, 110825. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110825

Hatiningsih, S., Antara, N. S., & Gunam, I. B. W. (2018). Microbiological and physicochemical changes of green coffee (Coffea arabica) fermentation in kintamani, bangli, bali. *Scientific Jprnal of Food Technology*. 5(2), 123–138. https://www.researchgate.net/publication/348650844_MICROBIOLOGICAL_AND_PHYSICOCHEMICAL_CHANGES_OF_GREEN_COFFEE_Coffea_arabica_FERMENTATION_IN_KINTAMANI

Henao-Arismendy, J. (2015). Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza. (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/56186

Hiperbaric. (s.f.). Hiperbaric high pressure technologies. https://www.hiperbaric.com/es/tecnologia-hpp/aplicaciones/

Houška, M., Silva, F. V. M., Evelyn, Buckow, R., Terefe, N. S., & Tonello, C. (2022). High pressure processing applications in plant foods. *Foods*, *11*(2), 223. https://doi.org/10.3390/foods11020223

Huang, H. W., Lung, H. M., Yang, B. B., & Wang, C. Y. (2014). Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing. *Food Control*, *40*, 250-259. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.12.007

Huch, M., & Franz, C. M. (2015). Coffee: Fermentation and microbiota. In *Advances in fermented foods and beverages* (pp. 501-513). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-015-6.00021-9

Illy, A. (2004). *Espresso coffee: the science of quality*. Elsevier. https://books.google.com.mx/books?hl=en&lr=&id=cptQBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Illy,+A.+(2004).+Espresso+coffee:+the+science+of+quality.+Elsevier.&ots=pumArmBtkK&sig=b_G7-a_OBHh-3VOKeMn4pqmUoFw&redir_esc=y#v=onepage&q=Illy%2C%20A.%20(2004).%20Espresso%20coffee%3A%20the%20science%20of%20quality.%20Elsevier.&f=false

Janowicz, M., & Lenart, A. (2018). The impact of high pressure and drying processing on internal structure and quality of fruit. *European Food Research and Technology*, *244*(8), 1329-1340. https://doi.org/10.1007/s00217-018-3047-y

Jayachandran, L. E., Chakraborty, S., & Rao, P. S. (2015). Effect of high pressure processing on physicochemical properties and bioactive compounds in litchi based mixed fruit beverage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *28*, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.01.002Get rights and content

Juárez González, T., Maldonado Astudillo, Y. I., González Mateos, R., Ramírez Sucre, M. O., Álvarez Fitz, P., & Salazar, R. (2021). Physicochemical and sensory characterization of coffee from the Guerrero Mountain. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *12*(6), 1057-1069. https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2773

Konman, C. 2016. Green coffee analytics. Relevance to roasters, buyers and producers. Part I. Moisture content and water activity. Royal Coffee. https://www.royalcoffee.com/gree-coffee-analytics-relevance-to-roasters-buyers-and-producers-part-i-moisture-content-and-total-water-activity/ . Verificado en diciembre 2024

Koutchma, T. (2014). Adapting high hydrostatic pressure (HPP) for food processing operations. Academic Press. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/85243647/B978-0-12-420091-3.00007-820220430-1-y7t5bx-libre.pdf?1651347945=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DAdapting_High_Hydrostatic_Pressure_for_F.pdf&Expires=1764627683&Signature=X3-68lP6FeoI~dDcTuCmp8a5gZXyzEflZj8rC1pma-vQZaCIKxMqsD81yOvimUMRo-iMLWkII7DCriNbBAb7AhhXpV0kXRClwjS1YvXT9VD2tY5LhhU~G65vEtbWrcqjobMkKxp51ieLrFj4QVV3S0gVRBIhCfLTyYv96rIf3QHgkOHcFL42kNRD~D5QMNdn0GTY5HsLvN2W-oi785hESZADFU-dKEzOhrzALZd8sW2Z514jUozt1l6IsVxKeqey50yY5Y9QBSSEACWcyxCXl5Rwcd8OqDgZJoHTEY9BgPZ1H1a71s-NWMAAk8x~iTFJZXnqZ-hOP9g5z3qpvHcB8g__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Kreuml, M. T., Majchrzak, D., Ploederl, B., & Koenig, J. (2013). Changes in sensory quality characteristics of coffee during storage. *Food Science & Nutrition*, *1*(4), 267-272. https://doi.org/10.1002/fsn3.35

Labbe, D., Schlich, P., Pineau, N., Gilbert, F., & Martin, N. (2009). Temporal dominance of sensations and sensory profiling: A comparative study. *Food Quality and Preference*, *20*(3), 216-221. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2008.10.001

Laukalēja, I., & Krūma, Z. (2018). Quality of specialty coffee: balance between aroma, flavour and biologically active compound composition. *Research for Rural Development*, *1*. https://10.22616/rrd.24.2018.038

Laukaleja, I., & Kruma, Z. (2019, mayo). *Influence of the roasting process on bioactive compounds and aroma profile in specialty coffee: A review.* En *Proceedings of the 13th Baltic Conference on Food Science and Technology and North and East European Congress on Food* (pp. 2–3). Jelgava, Latvia. https://doi.org/10.22616/FoodBalt.2019.002

Le Bihan, Z., Cosson, P., Rolin, D., & Schurdi-Levraud, V. (2020). Phenological growth stages of stevia (Stevia rebaudiana Bertoni) according to the Biologische Bundesanstalt Bundessortenamt and Chemical Industry (BBCH) scale. *Annals of Applied Biology*, *177*(3), 404-416. https://doi.org/10.1111/aab.12626

Le Quéré, J. L., & Schoumacker, R. (2023). Dynamic instrumental and sensory methods used to link aroma release and aroma perception: A review. *Molecules*, *28*(17), 6308. https://doi.org/10.3390/molecules28176308

Lee, E.-J., Kim, S.-H. & Park, S.-H. (2023). Effect of high hydrostatic pressure treatment on the inactivation and sublethal injury of foodborne pathogens and quality of apple puree at different pH. Food Microbiology, 114, 104302. https://doi.org/10.1016/j.fm.2023.104302

Lee, L. W., Cheong, M. W., Curran, P., Yu, B., & Liu, S. Q. (2015). Coffee fermentation and flavor–An intricate and delicate relationship. *Food chemistry*, *185*, 182-191. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.124

Martinez, S. J., Bressani, A. P. P., Simão, J. B. P., Pylro, V. S., Dias, D. R., & Schwan, R. F. (2022). Dominant microbial communities and biochemical profile of pulped natural fermented coffees growing in different altitudes. *Food Research International*, *159*, 111605. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111605

Martins, P. M. M., Batista, N. N., Miguel, M. G. D. C. P., Simão, J. B. P., Soares, J. R., & Schwan, R. F. (2020). Coffee growing altitude influences the microbiota, chemical compounds and the quality of fermented coffees. *Food Research International*, *129*, 108872. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108872

Meilgaard, M., Civille, G. V., & Carr, B. T. (2016). *Sensory evaluation techniques* (5th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003040729

Meléndez- Martínez A.J., Vicario M.I, Heredia J.F. (2004). Importancia nutricional de los pigmentos carotenoides. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*. 54(2):149-155. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0004-06222004000200011

Messens, W., Van Camp, J., & Huyghebaert, A. (1997). The use of high pressure to modify the functionality of food proteins. *Trends in Food Science & Technology*, *8*(4), 107-112. https://doi.org/10.1016/S0924-2244(97)01015-7

Moreira, G; Dionisio, A; Rodrigues, H.; Pinto, F.; Machado, S; Viana, A; Silvestre, G.; Carvalho, J; Da Silva, I; Guirado, A.; Ferreira, D y Zocolo, G. (2020). Effects of processing on the chemical, physicochemical, enzymatic, and volatile metabolic composition of pitaya (Hylocereus

polyrhizus (F.A.C. Weber) Britton & Rose). Food Research International, 127, 108710. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0004-06222004000200011

Nair, K. P. (2021). Tree crops. *Harvesting Cash from the World's Important Cash Crops, 1st ed.; Springer Nature: Cham, Switzerland*, 249-285. https://doi.org/10.1007/978-3-030-62140-7

Nath, K. G., Pandiselvam, R., & Sunil, C. K. (2023). High-pressure processing: Effect on textural properties of food-A review. *Journal of Food Engineering*, *351*, 111521. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2023.111521

Navarro-Baez, J. E., Martínez, L. M., Welti-Chanes, J., Buitimea-Cantúa, G. V., & Escobedo-Avellaneda, Z. (2022). High hydrostatic pressure to increase the biosynthesis and extraction of phenolic compounds in food: A review. *Molecules*, *27*(5), 1502. https://doi.org/10.3390/molecules27051502

Neves, A. L. S., Martinez, J. R., Maciel, M. I. S., de Melo, M. R. P., Veríssimo, C. M., & Arruda, L. L. D. A. L. (2023). Impact of the physicochemical parameters on the sensory characterization of Brazilian coffee by the CATA method. *Food Chemistry Advances*, *3*, 100403. https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100403

Ngadi, M. O., Latheef, M. B., & Kassama, L. (2011). Emerging technologies for microbial control in food processing. *Green technologies in food production and processing*, 363-411. http://10.1007/978-1-4614-1587-9_14

Nigam, P. S., & Singh, A. (2014). Cocoa and Coffee Fermentations. In C. A. Batt & M.-L. Tortorello (Eds.), Encyclopedia of Food Microbiology (2nd ed., Vol. 1, pp. 485–492). ISBN: 9780123847300. https://pure.ulster.ac.uk/en/publications/cocoa-and-coffee-fermentations-ii-3/

Oey, I., Lille, M., Van Loey, A., & Hendrickx, M. (2008). Effect of high-pressure processing on colour, texture and flavour of fruit-and vegetable-based food products: a review. *Trends in Food Science & Technology*, *19*(6), 320-328. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.04.001

Okur, İ.; Baltacıoğlu, C.; Ağçam, E.; Baltacıoğlu, H.; Alpas, H. Evaluation of the Effect of Different Extraction Techniques on Sour Cherry Pomace Phenolic Content and Antioxidant Activity and Determination of Phenolic Compounds by FTIR and HPLC. *Waste Biomass Valoriz.* **2019**, *10*, 3545–3555. 10.1007/s12649-019-00771-1

Onywera, H., & Meiring, T. L. (2020). Comparative analyses of ion torrent V4 and Illumina V3-V4 16S rRNA gene metabarcoding methods for characterization of cervical microbiota: taxonomic and functional profiling. *Scientific African*, *7*, e00278. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00278

Osorio, V., & Pabón, J. (2022). Efecto de las temperaturas y tiempos de tueste en la calidad sensorial del café. *Revista Cenicafé*, *73*(1), e73102-e73102. https://doi.org/10.38141/10778/73102

Osorio, V., Pabón, J., & Gómez, C. R. (2024). Efecto del porcentaje de humedad del café en la actividad de agua. *Revista Cenicafé*, *75*(1), e75104-e75104. https://doi.org/10.38141/10778/75104

Osorio, V., Pabón, J., Shuler, J., & Fernández-Alduenda, M. R. (2022). Efecto de la combinación de procesos de secado en la calidad del café natural obtenido vía seca. *Revista Cenicafé*, *73*(1), e73101. https://doi.org/10.38141/10778/73101

Pacheco-Aguirre, F.M, Ruiz-Reyez, M., Ruiz-Espinosa, H. Ruiz-López, I.I. (2023). Unidad de detección de compuestos aromáticos e infusiones de café. [Solicitud de patente]. Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial. MX/a/2023/003848

Paciulli, M., Medina Meza, I. G., Rinaldi, M., Ganino, T., Pugliese, A., Rodolfi, M. & Chiavaro, E. (2019). Improved physicochemical and structural properties of blueberries by high hydrostatic pressure processing. *Foods*, *8*(7), 272. https://doi.org/10.3390/foods8070272

Palczak, J., Blumenthal, D., Rogeaux, M., & Delarue, J. (2019). Sensory complexity and its influence on hedonic responses: A systematic review of applications in food and beverages. *Food Quality and Preference*, *71*, 66-75. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.06.002

Patras, A., Brunton, N. P., Da Pieve, S., & Butler, F. (2009). Impact of high pressure processing on total antioxidant activity, phenolic, ascorbic acid, anthocyanin content and colour of strawberry and blackberry purées. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *10*(3), 308-313. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.12.004

Patterson, M. F. (2005). Microbiology of pressure-treated foods. *Journal of applied microbiology*, *98*(6), 1400-1409. https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02564.x

Pazmiño-Arteaga, J. D., & Ruiz-Márquez, A. F. (2023). Sensorial and Aromatic Volatile Compounds Evaluation ff Coffee (Coffea Arábica Var. Caturra Chiroso) from Three Geographical Origins of Antioquia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *24*(1). https://doi.org/10.21930/RCTA.VOL24_NUM1_ART:2846

Pazmiño-Arteaga, J., Gallardo, C., González-Rodríguez, T., & Winkler, R. (2022). Loss of sensory cup quality: Physiological and chemical changes during green coffee storage. *Plant Foods for Human Nutrition*, *77*(1), 1-11. https://doi.org/10.1007/s11130-022-00953-8

Pérez Alcalá, D., Grande Burgos, M. J., Rodríguez López, J., Lucas, R., Gálvez, A., & Pérez Pulido, R. (2023). Effect of High Hydrostatic Pressure Processing on the Microbiological Quality and Bacterial Diversity of Sous-Vide-Cooked Cod. *Foods*, *12*(6), 1206. https://doi.org/10.3390/foods12061206

Pérez-Hernández, L., Chávez-Quiroz, K., I Medina-Juárez, A. L., & Gámez Meza, N. (2012). Phenolic Characterization, Melanoidins, and Antioxidant Activity of Some Commercial Coffees from Coffea arabica and Coffea canephora Article. In *J. Mex. Chem. Soc* (Vol. 56, Issue 4). ISSN 1870-249X. https://www.scielo.org.mx/pdf/jmcs/v56n4/v56n4a12.pdf

Pérez-Lamela, C., Franco, I., & Falqué, E. (2021). Impact of high-pressure processing on antioxidant activity during storage of fruits and fruit products: A review. *Molecules*, *26*(17), 5265. 10.3390/molecules26175265

Pérez-Ochoa M. (2016). *Compuestos fenólicos y perfil de ácidos grasos en granos de café (Coffea arabica L.) verde y tostado de variedades e híbridos cultivados en Coatepec, Veracruz.* [Tesis de doctorado, Universidad Veracruzana]. Repositorio Institucional – Universidad Veracruzana. https://www.uv.mx/mca/files/2018/01/I.-en-A.-Monica-Lilian-Perez-Ochoa.pdf

Poltronieri, P., & Rossi, F. (2016). Challenges in specialty coffee processing and quality assurance. *Challenges*, *7*(2), 19. https://doi.org/10.3390/challe7020019

Portillo, O. R. (2011). *El procesamiento del grano de café. Del tueste a la infusión. Revis Bionatura 2022; 7 (3) 18.* Food Science and Technology. https://doi.org/10.21931/RB/2022.07.03.18

Pothakos, V., De Vuyst, L., Zhang, S. J., De Bruyn, F., Verce, M., Torres, J., ... & Weckx, S. (2020). Temporal shotgun metagenomics of an Ecuadorian coffee fermentation process highlights the predominance of lactic acid bacteria. *Current Research in Biotechnology*, *2*, 1-15. https://doi.org/ 10.1016/j.crbiot.2020.02.001

Puerta-Quintero G. (2000). Calidad den taza de algunas variedades de café de las especie *Coffea arabica L. Cenicafé*, 51(1), 5–19. https://www.researchgate.net/profile/Gloria-Puerta-Quintero-2/publication/324065568_Calidad_en_taza_de_algunas_mezclas_de_variedades_de_cafe_de_la_especie_Coffea_arabica_L/links/5b529d00aca27217ffaaf082/Calidad-en-taza-de-algunas-mezclas-de-variedades-de-cafe-de-la-especie-Coffea-arabica-L.pdf

Quintanilla-Casas, B., Dulsat-Serra, N., Cortés-Francisco, N., Caixach, J., & Vichi, S. (2015). Thiols in brewed coffee: Assessment by fast derivatization and liquid chromatography–high resolution mass spectrometry. *LWT-Food Science and Technology*, *64*(2), 1085-1090. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.07.010Get rights and content

Quiñones-Ruiz, X. F. (2020). The diverging understandings of quality by coffee chain actors—Insights from Colombian producers and Austrian roasters. *Sustainability*, *12*(15), 6137. https://doi.org/10.3390/su12156137

Ramírez, V. H. (2014). *La fenología del café una herramienta para apoyar la toma de decisiones*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé).https://doi.org/10.38141/10779/0441

Ravichandran, C., Jayachandran, L. E., Kothakota, A., Pandiselvam, R., & Balasubramaniam, V. M. (2023). Influence of high pressure pasteurization on nutritional, functional and rheological characteristics of fruit and vegetable juices and purees-an updated review. *Food Control*, *146*, 109516. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.109516

Rendueles, E., Omer, M. K., Alvseike, O., Alonso-Calleja, C., Capita, R., & Prieto, M. (2011). Microbiological food safety assessment of high hydrostatic pressure processing: A review. *LWT-Food Science and Technology*, *44*(5), 1251-1260. http://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.001

Ribeiro, L. S., Evangelista, S. R., da Cruz Pedrozo Miguel, M. G., van Mullem, J., Silva, C. F., & Schwan, R. F. (2018). Microbiological and chemical-sensory characteristics of three coffee varieties processed by wet fermentation. *Annals of Microbiology*, *68*(10), 705-716. https://doi.org/10.1007/s13213-018-1377-4

Rios-Corripio, G., Welti-Chanes, J., Rodriguez-Martinez, V., & Guerrero-Beltrán, J. Á. (2020). Influence of high hydrostatic pressure processing on physicochemical characteristics of a fermented pomegranate (Punica granatum L.) beverage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *59*, 102249. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102249

Ruvalcaba-Gómez, J. M., Delgado-Macuil, R. J., Zelaya-Molina, L. X., Maya-Lucas, O., Ruesga-Gutiérrez, E., Anaya-Esparza, L. M., ... & Arteaga-Garibay, R. I. (2020). Bacterial succession through the artisanal process and seasonal effects defining bacterial communities of raw-milk Adobera cheese revealed by high throughput DNA sequencing. *Microorganisms*, *9*(1), 24. https://doi.org/10.3390/microorganisms9010024

Salar, F. J., Periago, P. M., Agulló, V., García-Viguera, C., & Fernández, P. S. (2021). High hydrostatic pressure vs. Thermal pasteurization: The effect on the bioactive compound profile of a citrus maqui beverage. *Foods*, *10*(10), 2416. https://doi.org/10.3390/foods10102416

Sánchez-Ramírez, J., Anaya-Sosa, I., Vizcarra-Mendoza, M. G., Gutiérrez-López, G., & Santiago-Pineda, T. (2007). Hydrodynamics Study Of Coffee Beans (Coffea Arabica L.) Roasted In Fluidized Bed. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 6(2):185-192. https://www.researchgate.net/publication/297531215_Hydrodynamics_study_of_coffee_beans_Coffea_arabica_L_roasted_in_fluidized_bed

Seninde, D. R., & Chambers, E. (2020). Coffee flavor: A review. *Beverages*, 6(3), 44. https://doi.org/10.3390/beverages6030044

Shen, X., Wang, Q., Wang, H., Fang, G., Li, Y., Zhang, J., & Liu, K. (2024). Microbial characteristics and functions in coffee fermentation: A review. *Fermentation*, *11*(1), 5. https://doi.org/10.3390/fermentation11010005

Shifera-Terefe, N & Buckow R. (2017). High pressure processing effects on endogenous enzymes in fruits and vegetables en Dobiáš, J., & Vápenka, L. (Ed.) Boca Ratón, *High pressure processing of fruit and vegetables products* (pp. 43-47). CRC Press. http://doi.org/10.1201/9781315121123-4

Silva, F. V. M., & Evelyn. (2023). Pasteurization of food and beverages by high pressure processing (HPP) at room temperature: Inactivation of Staphylococcus aureus, Escherichia coli, Listeria monocytogenes, Salmonella, and other microbial pathogens. *Applied Sciences,* 13(2), 1193. https://doi.org/10.3390/app13021193

Silva, S. de A.., De Queiroz, D. M., Pinto, F. de Ac., & Santos, N. T. (2014). Coffee quality and its relationship with Brix degree and colorimetric information of coffee cherries. *Precision agriculture*, *15*(5), 543-554. https://doi.org/10.1007/s11119-014-9352-y

Siqueira, V. C., Borém, F. M., Alves, G. E., Isquierdo, E. P., Pinto, A. C. F., Ribeiro, D. E., & Ribeiro, F. C. (2017). Drying kinetics of processed natural coffee with high moisture content. *Coffee Science*, 12(3), 400–409. https://doi.org/10.25186/cs.v12i3.1320

Soni, T., Pandit, R., Blake, D., Joshi, C., & Joshi, M. (2022). Comparative analysis of two next-generation sequencing platforms for analysis of antimicrobial resistance genes. *Journal of Global Antimicrobial Resistance,* 31, 167–174. https://doi.org/10.1016/j.jgar.2022.08.017

Specialty Coffee Association. (2024). The coffee taster flavor wheel. https://sca.coffee/research/coffee-tasters-flavor-wheel

Sudaryanto, A. (2020). Changes of Mechanical Properties and Color from Arabica Coffee Cherry to Green Bean. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(8), 4840–4844. https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/123882020

Sunarharum, W. B., Williams, D. J., & Smyth, H. E. (2014). Complexity of coffee flavor: A compositional and sensory perspective. Food Research International, 62, 315–325. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.030

Tofalo, R., Renda, G., De Caterina, R., & Suzzi, G. (2015). Coffee: health effects, In B. Caballero, P. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of food and health* 2: 237–243. DOI:10.1016/B978-0-12-384947-2.00182-3

Toledo, P. R., Pezza, L., Pezza, H. R., & Toci, A. T. (2016). Relationship between the different aspects related to coffee quality and their volatile compounds. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *15*(4), 705-719. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.030Get rights and content

Torres Bello, E. F., González Martínez, G., Klotz Ceberio, B. F., Rodrigo, D., & Martínez López, A. (2014). High pressure treatment in foods. *Foods*, *3*(3), 476-490. https://doi.org/10.3390/foods3030476

Torres Suarez, W. J., Otárola Gamarra, A., Candelario Ponce-Rosas, F., Murillo-Baca, S. M., Buendía-Ponce, H. R., Rodríguez Huatay, J. H., & Zambrano Díaz, M. C. (2024). La doble fermentación en la mejora de la calidad sensorial del café (Coffea arábiga). *Manglar*, *21*(2), 161-167. http://dx.doi.org/10.57188/manglar.2024.016.

Torres, B., Tiwari, B. K., Patras, A., Cullen, P. J., Brunton, N., & O'donnell, C. P. (2011). Stability of anthocyanins and ascorbic acid of high pressure processed blood orange juice during storage. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *12*(2), 93-97. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2011.01.005

Vaast, P y Bertrand, B. 2005. Date of harvest and altitude influence bean characteristics and beverage quality of *Coffea arabica* in intensive management conditions. Hort Sci. 40(2):295-301. 10.15446/acag.v64n4.44641

van Wyk, S., & Silva, F. V. (2017). High pressure processing inactivation of Brettanomyces bruxellensis in seven different table wines. *Food Control*, *81*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.05.028

Vargas-Ortiz, M. A., De la Cruz-Medina, J., Espinosa de los Monteros, J. J., Oliart-Ros, R. M., Rebolledo-Martinez, A., Ramírez, J. A., & García, H. S. (2013). Effect of high hydrostatic pressure on the physiology of Manila mango. *Plant foods for human nutrition*, *68*(2), 137-144. https://doi.org/10.1007/s11130-013-0347-z

Velásquez, S., Peña, N., Bohórquez, J. C., Gutierrez, N., & Sacks, G. L. (2019). Volatile and sensory characterization of roast coffees – Effects of cherry maturity. *Food Chemistry*, 274, 137–145. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.127

Vidal Villeda, M. A. (2014*). Rango ideal de concentración de sólidos solubles durante la maduración del café y su influencia sobre la calidad de taza, en dos variedades y tres niveles altitudinales* [Tesis doctoral, Universidad Rafael Landívar]. Repositorio Institcional – Universidad Rafael Landívar. http://biblio3.url.edu.gt/Tesario/2014/06/14/Vidal-Marco.pdf

Wang, Y., Ma, C.-M., Yang, Y., Wang, B., Liu, X.-F., Wang, Y., Bian, X., Zhang, G., & Zhang, N. (2024). Effect of high hydrostatic pressure treatment on food composition and applications in food industry: A review. *Food Research International*, 195, 114991. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114991

Wei, F. & Tanokura, M. (2024) Chemiccal changes in the components of coffee beans during roasting (2024). En V.R. Preedy. *Coffee in health and disease prevention* (83-90). (2da Ed.). Academic Press. ISBN 978-0-443-13868-3. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00010-3

Wintgens, J. N. (2004). The coffee plant. *Coffee: growing, processing, sustainable production: a guidebook for growers, processors, traders, and researchers*, 1-24. DOI: https://doi.org/10.1002/9783527619627

World Coffee Research. (s. f.). *Marsellesa* [Página de variedad]. Recuperado el 7 de septiembre de 2025, de https://varieties.worldcoffeeresearch.org/varieties/marsellesa

Yang, T., Sun, D.-W., & Górecki, A. B. (2012). Effects of high hydrostatic pressure processing on the physicochemical and sensorial properties of a red wine. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 16(3), 409–416. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2012.09.005

Yeretzian, C., Jordan, A., Badoud, R., & Lindinger, W. (2002). From the green bean to the cup of coffee: investigating coffee roasting by on-line monitoring of volatiles. *European Food Research and Technology*, *214*(2), 92-104. https://doi.org/10.1007/s00217-001-0427-z

Zhang, S. J., De Bruyn, F., Pothakos, V., Contreras, G. F., Cai, Z., Moccand, C., Weckx, S. & De Vuyst, L. (2019). Influence of various processing parameters on the microbial community dynamics, metabolomic profiles, and cup quality during wet coffee processing. *Frontiers in Microbiology*, *10*, 2621. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02621