



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), enero-febrero 2026,
Volumen 10, Número 1.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i1

DETERMINANTES PROTEICOS DE LA CALIDAD EN CAFÉ (COFFEA SP.): UNA REVISIÓN SOBRE LA INTERACCIÓN Y MODIFICACIÓN ENZIMÁTICA POST-COSECHA

**TECHNOLOGY-ASSISTED EARLY CHILDHOOD EDUCATION:
CHALLENGES FOR THE DIGITAL EDUCATOR**

Jacobo Vallejo Castellanos
investigador Independiente, México

Sarahi Sanchez Granillo
Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, México

Dalila Reyes Sampieri
Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, México

Damariz Arragan Espinosa
Instituto Tecnológico Superior de Huatusco, México

Determinantes Proteicos de la Calidad en Café (*Coffea* sp.): Una Revisión sobre la Interacción y Modificación Enzimática Post-Cosecha

Jacobo Vallejo Castellanos¹

jvc560@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-1638-3247>

Investigador Independiente

México

Sarahi Sanchez Granillo

m233z2001@alum.huatusco.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0009-8299-8372>

Instituto Tecnológico Superior de Huatusco

México

Dalila Reyes Sampieri

dreyess@huatusco.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0004-5538-220X>

Instituto Tecnológico Superior de Huatusco

México

Damariz Arragan Espinosa

darragane@huatusco.tecnm.mx

<https://orcid.org/0009-0003-5258-3375>

Instituto Tecnológico Superior de Huatusco

México

RESUMEN

El objetivo de la presente revisión es establecer el rol crítico de la fracción proteica, específicamente la Globulina 11S, como determinante fundamental de la calidad sensorial del café (*Coffea* sp.), aspecto frecuentemente subestimado frente a los metabolitos secundarios. Mediante un análisis de la literatura bioquímica reciente bajo un enfoque de biología de sistemas, se examinaron las transformaciones moleculares durante el desarrollo y procesamiento del grano. Los hallazgos revelan que el beneficio post-cosecha actúa como un biorreactor diferenciado: el método lavado promueve la oxidación enzimática limitando la disponibilidad de aminoácidos, mientras que los procesos naturales inducen rutas de estrés metabólico e hidrólisis térmica que enriquecen los precursores de la reacción de Maillard. Adicionalmente, se evidencia una fuerte interacción Genotipo-Ambiente, donde el estrés climático desplaza la síntesis de proteínas de almacenamiento hacia variantes de defensa, modificando el perfil de taza. Se concluye identificando la necesidad urgente de reevaluar los factores de conversión de nitrógeno utilizados industrialmente y se propone la ingeniería enzimática durante la fermentación como estrategia para asegurar la consistencia de la calidad frente a la variabilidad climática.

Palabras clave *Coffea*; Globulina 11S, Procesamiento post-cosecha, Proteómica, Calidad sensorial

¹ Autor principal

Correspondencia: jvc560@hotmail.com

Protein determinants of quality in coffee (*Coffea* spp.): a review on post harvest enzymatic interaction and modification

ABSTRACT

The objective of this review is to establish the critical role of the protein fraction, specifically 11S globulin, as a fundamental determinant of the sensory quality of coffee (*Coffea* sp.), an aspect frequently underestimated compared to secondary metabolites. Through an analysis of recent biochemical literature using a systems biology approach, molecular transformations during bean development and processing were examined. The findings reveal that post-harvest processing acts as a differentiated bioreactor: the washed method promotes enzymatic oxidation, limiting amino acid availability, while natural processes induce metabolic stress pathways and thermal hydrolysis that enrich Maillard reaction precursors. Additionally, a strong genotype-environment interaction is evident, where climatic stress shifts the synthesis of storage proteins toward defense variants, modifying the cup profile. The review concludes by identifying the urgent need to re-evaluate industrially used nitrogen conversion factors and proposes enzyme engineering during fermentation as a strategy to ensure consistent quality in the face of climatic variability.

Keywords: 11S globulin, Post-harvest processing, Proteomics, Sensory quality

Artículo recibido 22 diciembre 2025

Aceptado para publicación: 26 enero 2026



INTRODUCCIÓN

El café (*Coffea* sp.) se ha consolidado como una de las mercancías más valiosas del comercio global (Zaman & Shan, 2024), no solo por su efecto estimulante sino por la extraordinaria complejidad de su perfil sensorial (Jan-Smith et al., 2025; Rogers et al., 1999), es mucho más que una bebida estimulante es un fenómeno sensorial complejo que comienza mucho antes de llegar a la taza (Li et al., 2023; Cheng et al., 2018), para el consumidor promedio la calidad se percibe a través del aroma y el sabor (Zainuri et al., 2023), atributos que a menudo se atribuyen erróneamente solo al tueste o a la variedad (Cheng et al., 2018; Zaman & Shan, 2024), para la industria y el consumidor la calidad de la bebida se define por atributos como la acidez, el cuerpo y el aroma (Jan-Smith et al., 2025). Sin embargo, desde una perspectiva molecular, el grano de café verde es un “contenedor biológico” inactivo que almacena los precursores químicos necesarios para generar estos atributos (Li et al., 2023; Rogers et al., 1999), sin embargo el verdadero arte reside en la composición química “cruda”, sin modificar del grano verde en donde el grano no debe ser considerado como un ingrediente inerte, sino como un contenedor biológico lleno de 'piezas de construcción' —proteínas, grasas y azúcares— (Cheng et al., 2018; Li et al., 2023), que bajo el calor del tostador, se ensamblarán para crear los más de 1,000 compuestos aromáticos que disfrutamos (Jan-Smith et al., 2025; Rogers et al., 1999).

Históricamente la investigación se ha centrado en metabolitos secundarios bioactivos, como la cafeína y los ácidos clorogénicos (CGA), debido a sus implicaciones fisiológicas (Zaman & Shan, 2024; Figueroa Campos et al., 2022) no obstante, esta visión tradicional a menudo subestima el papel de las macromoléculas estructurales, específicamente proteínas y lípidos, las cuales constituyen la verdadera “materia prima” para la generación de sabor (Fabella-Garcia et al., 2025; Rogers et al., 1999).

A diferencia de lo que ocurre en otros cultivos, las proteínas del café no son valoradas por su aporte nutricional, sino por su reactividad térmica (Zaman & Shan, 2024; Figueroa Campos et al., 2022), el grano verde contiene entre un 8.5% y un 12% de proteínas siendo la Globulina 11S (una proteína de almacenamiento tipo legumina) el componente mayoritario, representando cerca del 45% de la proteína total (Rogers et al., 1999; Cheng et al., 2018).

Bioquímicamente la importancia de esta fracción radica en su degradación durante el proceso de tueste,



las cadenas polipeptídicas y los aminoácidos libres actúan como grupos amino nucleofílicos necesarios para la reacción de Maillard (Figueroa Campos et al., 2022; Li et al., 2023). Al reaccionar con azúcares reductores, dan lugar a la formación de pirazinas (notas a nuez/tostado), pirroles y melanoidinas, compuestos responsables del color y el cuerpo de la taza (Montavon et al., 2003; Jan-Smith et al., 2025).

METODOLOGÍA

La composición química del grano de café comienza a definirse mucho antes de la recolección, en una etapa de intensa actividad metabólica regulada por la fenología de la planta, según los estudios más recientes la transición de la cereza verde a la cereza madura no es simplemente un cambio de color, sino una reprogramación genética compleja orientada a preparar a la semilla para su supervivencia y dispersión (Cheng et al., 2018).

Durante esta fase el metabolismo del fruto se centra en dos procesos simultáneos y aparentemente contradictorios: la acumulación de reservas y la degradación de estructuras, por un lado se observa un pico máximo en la expresión de genes que codifican para la Globulina 11S la proteína de almacenamiento mayoritaria, esta proteína se sintetiza y se deposita en cuerpos proteicos dentro del endosperma, constituyendo la principal reserva de nitrógeno que posteriormente será crucial para la reacción de Maillard (Rogers et al., 1999). Simultáneamente investigaciones de metabolómica integrada han revelado que la maduración induce una sobreexpresión significativa de enzimas hidrolíticas, específicamente la β galactosidasa y diversas cisteína-proteasas (Li et al., 2023), estas enzimas inician un proceso de ablandamiento biológico, degradando las pectinas de la pared celular y realizando cortes específicos en las proteínas de reserva, este mecanismo fisiológico tiene como objetivo incrementar la disponibilidad de azúcares simples y aminoácidos libres justo antes de la cosecha, enriqueciendo el perfil de precursores de sabor que distingue a un grano maduro de uno inmaduro (Li et al., 2023; Jan-Smith et al., 2025).

La acumulación de estos precursores no es un proceso estático, sino que está finamente regulada durante la fenología del fruto (Cheng et al., 2018). Estudios recientes de metabolómica integrada han demostrado que la maduración del grano implica una reprogramación enzimática específica (Li et al., 2023), en las etapas finales de maduración, se observa una sobreexpresión de enzimas como la β -galactosidasa y

diversas cisteína-proteasas (Li et al., 2023), estas enzimas catalizan la degradación controlada de la pared celular y de las proteínas de reserva, incrementando la disponibilidad de aminoácidos libres y azúcares simples justo antes de la cosecha, lo que explica molecularmente la superioridad sensorial de los granos recolectados en su punto óptimo de madurez (Li et al., 2023; Jan-Smith et al., 2025).

Tabla 1 Composición Bioquímica del Fruto de Café Maduro (Cereza Intacta)

Tejido Anatómico	Componentes	Función Fisiológica e Importancia en	Referencia
	Químicos Dominantes	Cosecha	Clave
Exocarpio (Piel/Cáscara)	Antocianinas (Cianidina-3-rutinósido) y Carotenoides	Responsables del cambio de color (verde a rojo/amarillo). Actúan como "semáforo visual" para la cosecha selectiva y protegen al fruto de la radiación UV (antioxidantes).	Prata et al. (2007); Cheng et al. (2016)
Mesocarpio Exterior (Pulpa)	Azúcares Reductores (Glucosa, Fructosa) y Agua (aprox. 80%)	Es el reservorio de energía para la semilla. Su alto contenido de agua y azúcares simples lo hace el sustrato perfecto para la fermentación microbiana inmediata tras el despulpado.	Murthy & Naidu (2012); Jan-Smith et al. (2025)
Mesocarpio Interior (Mucílago)	Pectinas (Polisacáridos) y Enzimas Pectolíticas	Capa hidrocoloidal viscosa rica en ácido galacturónico. Su degradación es el objetivo principal de la fermentación en cafés lavados; determina la textura "pegajosa" en los Honey.	Avallone et al. (2001); Figueroa Campos et al. (2022)

Endosperma (Semilla/Grano)	Proteínas de Reserva (Globulina 11S)	En la madurez, la acumulación de la proteína 11S alcanza su máximo (aprox. 45% de la proteína total). Es la fuente de nitrógeno lista para la futura germinación (o para la reacción de Maillard en el tueste).	Rogers et al. (1999); Koshino et al. (2004)
Endosperma (Bioactivos)	Cafeína y Ácidos Clorogénicos (CGA)	Alcanzan su equilibrio final. La cafeína actúa como defensa química contra plagas que intentan comer el fruto maduro. Los CGA están listos para regular la oxidación.	Perrois et al. (2015); Koshiro et al. (2006)
Enzimas Endógenas	Polifenol Oxidasa (PPO) y Peroxidasas	Están presentes pero "latentes" o compartimentadas en los plastidios. Se activan violentamente al romper la estructura celular (despulpado), iniciando la oxidación (pardeamiento).	Mazzafera & Robinson (2000); Burnett et al. (2011)
Hormonas Vegetales	Etileno	Hormona gaseosa que regula la maduración final. Su producción incrementa la actividad de enzimas que ablandan la pared celular, haciendo la cereza suave al tacto.	Pereira et al. (2005)

Una vez separado de la planta, el grano entra en una fase crítica donde el método de beneficio actúa como un catalizador de cambios bioquímicos irreversibles (Figuerola Campos et al., 2022; Zaman & Shan, 2024) en este punto el grano no es una materia inerte, sino un organismo vivo sometido a estrés



que responde metabólicamente a las condiciones externas (Selmar et al., 2008; Hao et al., 2024).

Beneficio húmedo: Interacción Mucílago-Semilla y Modulación Proteica

En el beneficio húmedo la remoción del exocarpio y la exposición al ambiente acuoso desencadenan una cascada oxidativa inmediata. La entrada masiva de oxígeno activa la enzima polifenol oxidasa (PPO), la cual cataliza la oxidación de los ácidos clorogénicos, principalmente el ácido 5-cafeoilquínico, transformándolos en o-quinonas altamente reactivas. Estas moléculas electrofílicas atacan los grupos nucleofílicos de las proteínas, generando enlaces covalentes irreversibles con los residuos de lisina y cisteína (Figueroa Campos et al., 2022).

Este fenómeno tiene dos consecuencias críticas para la calidad:

Reducción de Precusores: Reduce la solubilidad de las proteínas y disminuye la cantidad de aminoácidos libres disponibles para el tueste, al haber "secuestrado" parte de los precursores necesarios para las notas a nuez y chocolate (Montavon et al., (2003)).

Lixiviación de Solubles: Paralelamente, el contacto prolongado con el agua provoca la lixiviación (pérdida por lavado) de azúcares simples y minerales (Zhang et al., 2019).

Esto explica bioquímicamente por qué los cafés lavados tienden a tener un cuerpo más ligero y una acidez más brillante: la "limpieza" de fenoles oxidados elimina el amargor, mientras que la reducción de proteínas solubles disminuye la viscosidad de la bebida.

Así mismo dentro de los procesos húmedos podemos encontrar por eso el de fermentación en las que el café es inducido en diferentes recipientes y condiciones que actúan como "biorreactores", alterando su proteoma (Zaman & Shan, 2024). En el beneficio húmedo, la hidratación y la exposición al oxígeno activan la enzima Polifenol Oxidasa (PPO) (Figueroa Campos et al., 2022), esta enzima cataliza la oxidación de los ácidos clorogénicos (5-CQA) a o-quinonas, especies altamente electrofílicas que reaccionan covalentemente con los grupos epsilon-amino de los residuos de lisina en las proteínas (Figueroa Campos et al., 2022; Montavon et al., 2003), este fenómeno conocido como modificación post-traducciona inducida por procesamiento, reduce la solubilidad de las proteínas y "secuestra" aminoácidos esenciales, modificando el potencial del grano para generar ciertos perfiles aromáticos (Figueroa Campos et al., 2022).

Por el contrario, procesos como el secado lento o la fermentación anaeróbica inducen rutas de estrés



metabólico, como la vía del GABA (GABA shunt) (Selmar et al., 2008), y la acumulación de aminoácidos hidrofóbicos (Leucina, Fenilalanina) por proteólisis activa, enriqueciendo el sustrato para la reacción de Maillard (Arnold & Ludwig, 1996; Hao et al., 2024).

El Proceso Honey: Interacción Mucílago-Semilla y Modulación Proteica

El proceso conocido como "Honey" o semi-seco representa un punto intermedio bioquímico entre el método lavado y el natural, en este sistema el exocarpio (piel) es removido mecánicamente, pero el mesocarpio (mucílago) rico en polisacáridos pécticos y azúcares reductores se conserva adherido al pergamino durante la fase de secado, desde una perspectiva proteómica este método se distingue por evitar la lixiviación masiva de compuestos solubles típica del lavado, mientras modula la exposición oxidativa a través de la capa de mucílago.

La presencia del mucílago crea una dinámica dual para la fracción proteica del grano, en primer lugar actúa como una barrera física que limita la difusión directa de oxígeno hacia el endosperma moderando la actividad de la Polifenol Oxidasa (PPO), aunque la despulpación inicial activa la PPO y genera ciertas o-quinonas, la capa viscosa de pectina impide que la oxidación sea tan agresiva y penetrante como en el beneficio lavado, reduciendo la formación de aductos proteína-fenol insolubles y preservando una mayor proporción de proteínas en su estado nativo o soluble (Figuerola Campos et al., 2022; Tarzia et al., 2010).

En segundo lugar, el mucílago sirve como un reservorio de agua y sustratos para la actividad microbiológica superficial, aunque existe un debate sobre si los azúcares del mucílago pueden migrar físicamente hacia el interior del grano denso, la evidencia sugiere que su impacto es metabólico: la capa hidratada ralentiza la tasa de secado, manteniendo la actividad de agua A_w en niveles que permiten a las enzimas endógenas del grano operar por más tiempo antes de la dormancia, esto favorece una hidrólisis proteica extendida, similar a la observada en el secado natural, permitiendo la acumulación de aminoácidos libres (Arnold & Ludwig, 1996; Coradi et al., 2020).

A diferencia del método lavado, donde los aminoácidos hidrosolubles se pierden por lixiviación en los tanques de agua, el proceso Honey retiene la integridad del citoplasma. Hao et al. (2024) y Zhang et al. (2019) señalan que la ausencia de una etapa de inmersión prolongada preserva la concentración de Asparagina y aminoácidos hidrofóbicos dentro de la célula.



El resultado es un grano verde con una carga de precursores "híbrida":

Alta disponibilidad de grupos Amino: Al haber menos "secuestro" por quinonas (menos oxidación que el lavado) y nula pérdida por lavado, hay más aminoácidos disponibles para reaccionar.

Azúcares Reductores: La retención de sacarosa interna, sumada a la preservación de proteínas, crea un potencial químico elevado para la reacción de Maillard.

Esto explica sensorialmente por qué los cafés Honey suelen presentar un cuerpo más sedoso y pesado que un lavado (debido a las proteínas/melanoidinas) y una dulzura percibida superior, pero con una acidez más baja y redondeada, ya que la fermentación del mucílago produce ácidos lácticos y acéticos que penetran el pergamino y modifican el pH final del grano (Dybowska et al., 2017).

Es importante notar y entender que el "color" del Honey influye directamente en la bioquímica, un Black Honey (máximo mucílago) se acerca al comportamiento de un Natural, con mayor actividad fermentativa y mayor riesgo de estrés anaeróbico que activa la vía del GABA (Selmar et al., 2008), por el contrario un Yellow Honey (poco mucílago) se seca más rápido, deteniendo antes la actividad enzimática y resultando en un perfil más cercano al Lavado, con menos hidrólisis proteica y mayor claridad enzimática.

Tabla 2 Impacto del Procesado Honey en la Bioquímica Proteica y el Perfil Sensorial del Café

Método	Estado de las Proteínas		Mecanismo Clave		Resultado Sensorial
Honey	Preservación		Hidrólisis	Extendida	+ Cuerpo Sedoso y Dulzor.
(Miel)	Balanceada.	Menor	Difusión Ácida.	El mucílago	El equilibrio perfecto entre
		oxidación que el Lavado	retarda el secado	permitiendo	aminoácidos preservados y
		(barrera de mucílago) y	a las proteasas	trabajar más	acidez modulada por
		CERO lixiviación (no hay	tiempo;	metabolitos	del fermentación láctica
		agua).	mucílago pueden difundir.		superficial.

El Proceso Natural

Por el contrario, durante el secado o el beneficio natural, el grano experimenta un estrés hídrico progresivo que activa mecanismos de supervivencia celular, estudios fundamentales han demostrado que mientras el embrión permanezca viable, la semilla activa su metabolismo anaeróbico y rutas de

defensa como la vía del GABA (GABA shunt), en este proceso el glutamato almacenado se descarboxila para formar ácido gamma-aminobutírico (GABA), alterando el perfil de aminoácidos y la acidez percibida otorgando notas más complejas y menos "carnosas" que el glutamato puro (Selmar et al., 2008).

Adicionalmente el manejo de la temperatura juega un rol enzimático crucial, si el secado se realiza a temperaturas moderadas cercanas a los 40°C, se favorece una hidrólisis proteica térmica donde las proteasas endógenas, aún activas por la humedad remanente degradan las cadenas polipeptídicas para liberar aminoácidos hidrofóbicos como la leucina y la fenilalanina este proceso enriquece sustancialmente el sustrato para la formación de aromas complejos durante el tueste diferenciando el perfil sensorial del natural frente al lavado (Arnold & Ludwig, 1996).

El método natural o beneficio seco, es el más antiguo y paradójicamente el que impone la mayor carga fisiológica sobre la semilla (Bytof et al., 2005), a diferencia de los métodos hídricos donde el metabolismo se detiene o altera rápidamente, el secado del fruto entero prolonga la actividad biológica del grano durante periodos que pueden superar los 20 días (Selmar et al., 2008), bioquímicamente este proceso no es una simple deshidratación, sino un evento de maduración post-cosecha inducida por estrés (Kleinwächter & Selmar, 2010; Bytof et al., 2005).

La característica definitoria del natural es la preservación del exocarpio (piel) y el mesocarpio (pulpa) hasta el final del secado, esta barrera física tiene un efecto proteómico crucial: bloquea la entrada masiva de oxígeno.

Al limitar la difusión de O_2 se impide la activación agresiva del polifenol oxidasa (PPO), en consecuencia, los ácidos clorogénicos no se oxidan masivamente a quinonas y por tanto, no ocurren los ataques covalentes a la Lisina y Cisteína observados en el lavado. Esto significa que las proteínas de reserva (Globulina 11S) mantienen su solubilidad y estructura nativa mucho mejor, preservando el nitrógeno intacto para reacciones futuras (Figuerola Campos et al., 2022; Montavon et al., 2003).

Al deshidratarse lentamente bajo el sol, el grano entra en un estado de estrés hídrico severo para evitar la muerte celular la maquinaria genética del grano activa protocolos de supervivencia, (Selmar et al. (2008) y Bytof et al. (2005) documentaron que este estrés induce la expresión de la enzima Glutamato Descarboxilasa (GAD), esta enzima toma el Glutamato el aminoácido libre más abundante y responsable

de notas “carnosas” y lo convierte en GABA (Ácido Gamma-Aminobutírico) esta conversión reduce la sensación de sabor salado crudo y aporta complejidad, asociándose con la dulzura percibida y el equilibrio de la bebida final.

A diferencia del lavado donde hay pérdida de materia (lixiviación) el natural es un sistema de concentración, todo lo que estaba en el grano se queda en el grano y parte de lo que estaba en la pulpa (azúcares y ácidos) puede migrar hacia adentro o metabolizarse en la interfase.

Además, la larga exposición al calor del sol frecuentemente alcanzando 30-40°C internos en los patios favorece una proteólisis térmica acelerada, las proteasas endógenas rompen las cadenas de la Globulina 11S, liberando una gran cantidad de aminoácidos hidrofóbicos Leucina, Isoleucina, Fenilalanina, al no haber agua para lavarlos, estos aminoácidos se acumulan en concentraciones muy superiores a las de cualquier otro proceso (Arnold & Ludwig, 1996; Koshino et al., 2004).

La combinación de una alta retención de proteínas solubles por baja oxidación, acumulación de GABA y una concentración máxima de aminoácidos precursores y azúcares, crea el escenario perfecto para una Reacción de Maillard explosiva durante el tueste, generando un cuerpo pesado debido a la alta concentración de proteínas solubles y cadenas largas de azúcares lo que genera dulzor Intenso Por la ausencia de lixiviación de sacarosa y glucosa (Dybkowska et al., 2017; Peñuela et al., 2010) así mismo una complejidad con sabores a vinosa/frutal, derivada de los ésteres volátiles producidos por el metabolismo anaeróbico parcial y la fermentación de la pulpa seca.

Tabla 3 Dinámica de Aminoácidos y Reacciones de Maillard en Cafés de Proceso Seco

Método	Estado de las Proteínas	Mecanismo Clave	Resultado Sensorial
Natural (Seco)	Intactas y Concentradas. Mínima oxidación de fenoles. Alta hidrólisis térmica que libera aminoácidos.	Metabolismo de (GABA) + Concentración. El grano vivo responde a la sequía transformando glutamato en GABA. No hay lavado de nutrientes (Sistema cerrado).	Cuerpo Máximo y Frutosidad. La mayor carga de precursores de Maillard (AAs + Azúcares) genera la taza más intensa, dulce y compleja, a riesgo de notas

fermentadas si el secado falla.

Tabla 4 Diferenciación Crítica de proteínas con Otros Métodos postcosecha

Característica	Método Lavado (Washed)	Métodos Secos (Natural/Honey)	Referencia
			Clave
Estado Metabólico	Oxidativo. Alta actividad de PPO y oxidación de fenoles.	De Estrés (Anóxico/Hídrico). Activación de rutas de supervivencia (GABA shunt).	Selmar et al. (2008)
Proteínas 11S	Modificadas Covalentemente. Forman complejos insolubles con quinonas.	Nativas o Hidrolizadas. Se conservan mejor o se rompen en aminoácidos libres por calor.	Figueroa Campos et al. (2022)
Aminoácidos Libres	Reducidos. Por lixiviación (lavado) y bloqueo químico (Lisina).	Aumentados. Por proteólisis térmica y concentración sin lavado.	Arnold & Ludwig (1996)
Perfil de Sabor	Acidez alta, claridad, cuerpo ligero.	Dulzor alto, cuerpo pesado, complejidad vinosa.	Dybkowska et al. (2017)

Composición del Grano Verde (Matriz Estabilizada)

Al finalizar el procesamiento el grano verde se convierte en una matriz biológica estabilizada con un contenido de humedad del 10-12%, lista para el tueste (Selmar et al., 2008; Zaman & Shan, 2024), en esta etapa su composición es el resultado acumulativo de la genética (Cheng et al., 2018) y el estrés post-cosecha (Figueiredo de Abreu et al., 2018; Selmar et al., 2008).

La fracción proteica que representa entre el 8.5% y el 12% del peso seco, está dominada estructuralmente por la Globulina 11S (legumina), esta proteína se encuentra almacenada en una conformación hexamérica muy estable, compuesta por subunidades ácidas α de aproximadamente 32 kDa y subunidades básicas β de 22 kDa, unidas por puentes disulfuro que aportarán el azufre necesario para

los aromas volátiles característicos del café (Rogers et al., 1999; Zaman & Shan, 2024), junto a las proteínas la fracción lipídica juega un papel estructural y sensorial determinante, los lípidos constituidos mayoritariamente por triglicéridos y ésteres de diterpenos como el cafestol y el kahweol, se encuentran protegidos dentro de cuerpos oleosos recubiertos por proteínas específicas llamadas oleosinas, análisis recientes de lipidómica sugieren que la abundancia relativa de estos diterpenos no solo sirve como huella dactilar para diferenciar especies de *C. arabica* vs. *C. canephora*, sino que también actúa como un antioxidante natural que protege la integridad del grano durante el almacenamiento prolongado (Fabella-Garcia et al., 2025), finalmente toda esta maquinaria bioquímica se encuentra embebida en una pared celular rígida de polisacáridos (galactomananos), la cual, aunque no tiene sabor propio es fundamental para retener la presión y los gases durante el tueste, permitiendo el desarrollo físico adecuado del grano (Cheng et al., 2018).

Composición Química del Grano Verde: La Matriz No Proteica

Si bien la fracción proteica y su degradación constituyen el eje central de la generación de precursores nitrogenados, sería reduccionista considerar al grano de café verde (green coffee bean) únicamente como un reservorio de aminoácidos, bioquímicamente el endosperma es una matriz heterogénea y densa donde las proteínas coexisten en un equilibrio estequiométrico con carbohidratos, lípidos y metabolitos secundarios bioactivos ((Farah, 2012)).

Los componentes más abundantes (50-60% del peso seco) son dos grupos cruciales:

A. Los Insolubles: Son la fibra estructural, principalmente Mananos y Celulosa (Redgwell et al., 2002), forman la pared celular dura del grano, son los que retienen los gases y aceites dentro de la célula; sin esta estructura fuerte el grano no "tronaría" en el tueste, sino que se quemaría en silencio (Schenker et al., 2000), la maduración perfecta ablanda ligeramente esta pared (gracias a enzimas como pectinasas), permitiendo que el calor entre mejor (Joët et al., 2010).

B. Los Solubles (Sacarosa), *Arabica* (6-9%) vs. *Robusta* (3-5%) (Ky et al., 2001) esta no da dulzor directo al café (porque se destruye casi toda en el tueste), su función es romperse para generar ácidos alifáticos como el ácido acético/vinagre que da complejidad y participar en la reacción de Maillard para dar color y notas de caramelo (De Maria et al., 1996; Ginz et al., 2000).

Lípidos (Textura y el Aroma), el café tiene una cantidad de grasa *Arabica*: 15-17%, *Robusta*: 10-12%



dispersas en el citoplasma, principalmente Triglicéridos y Diterpenos (Cafestol y Kahweol) (Speer & Kölling-Speer, 2006), muchos compuestos aromáticos son solubles en grasa no en agua, el aceite atrapa esos olores y los libera en tu boca (Villarreal et al., 2009).

Ácidos Clorogénicos (CGA), el café es la fuente más rica del reino vegetal en estos compuestos especialmente el 5-CQA (Clifford, 1999) en Verde son antioxidantes potentes y actúan como defensa contra insectos (son amargos) (Farah, 2012), en taza son los responsables de la acidez si se rompen un poco dan acidez cítrica/brillante, si se rompen demasiado se convierten en lactonas (amargor agradable) (Farah et al., 2005), si se queman se vuelven fenil-indanos (amargor metálico y áspero) (Frank et al., 2007).

Alcaloides

Cafeína con un 1-2%, es un pesticida natural muy estable sobrevive al tueste casi intacta, aporta el amargor primario y el efecto estimulante (Belay et al., 2008).

Trigonelina con ~1%, en verde es amarga, al tostarse se degrada rápidamente y produce Niacina (Vitamina B3)

Piridinas compuestos volátiles que dan aromas tostados, dulces y terrosos (Stadler et al., 2002), el *Arabica* tiene más trigonelina que el Robusta, lo que explica en parte su mejor aroma (Ky et al., 2001).

Humedad, el grano verde debe tener entre 10% y 12% de agua, menos del 9% se blanquea y el sabor se desvanece (notas a paja), más del 12% riesgo de hongos (moho) y sabores fermentados indeseables (Borém et al., 2013; Coradi et al., 2020).

Tabla 5 Caracterización Bioquímico-Molecular de la Fracción Proteica y Aminoacídica en las Etapas del Procesamiento del Café

Etapa / Método de		Parámetro	Efecto	en	Mecanismo	Referencias
Procesamiento		Bioquímico / Unidad	Proteínas y Aminoácidos		Bioquímico y Molecular	
Maduración (Pre-Cosecha)		Expresión	Aumento drástico		Regulación	Li et al. (2023);
		Enzimática	de aminoácidos		genética	de Cheng et al.
		Actividad específica)	libres y actividad de endoproteasas		enzimas	de (2018); Mariotti et al.

			justo antes de la cosecha óptima.	(β-galactosidasa, Cisteína-proteasa) que degradan pared celular y reservas proteicas.	(2021); Privat et al. (2008); Pereira et al. (2020).
Beneficio (Despulpado)	Húmedo	Modificación Estructural	Pérdida de solubilidad proteica y disminución de Lisina y Cisteína libres (esenciales para Maillard). "Limpieza" de astringencia pero reducción de notas a nuez.	de La exposición al O_2 activa la Polifenol Oxidasa (PPO), oxidando 5-CQA a quinonas que se unen covalentemente a las proteínas.	Figueroa Campos et al. (2022); Montavon et al. (2003); Mazzafera (1999); Kleinwächter & Selmar (2010); Tarzia et al. (2010).
Fermentación (Húmeda/Sumergida)		Perfil de Aminoácidos Libres (HPLC, mg/g)	de Incremento neto de aminoácidos hidrofóbicos (Leu, Ile, Phe, Val) y aromáticos. Cambios en la acidez que afectan el punto	La acidificación (bacterias lácticas) activa proteasas del grano. Levaduras secretan proteasas exógenas que rompen la Globulina 11S.	Hao et al. (2024); Wu et al. (2024); Koshino et al. (2004); Lee et al. (2015); Zhang et al. (2019); De Bruyn et al.

				isoelectrico		(2017); Silva et al. (2013).
				proteico.		
Beneficio (Natural)	Seco	Metabolitos de Estrés (Abundancia relativa 2D-PAGE)	Preservación de proteínas nativas e inducción de proteínas de estrés (HSP70, "GABA-shunt" y dehidrinas) y acumulación de antioxidantes (ácido gamma-aminobutírico)	El secado lento mantiene la célula viva bajo estrés, activando el "GABA-shunt" y rutas para proteger la integridad proteica.		Figueiredo de Abreu et al. (2018); Selmar et al. (2008); Bytof et al. (2005); Arruda et al. (2011); Kramell et al. (2015); Duarte et al. (2010).
		Fragmentación Proteica (SDS-PAGE, kDa)	Degradación específica de la subunidad α (32 kDa) de la legumina 11S. Pérdida de materia seca si se prolonga >24h.	Activación del programa de germinación; las proteasas rompen la proteína de almacenamiento para alimentar al embrión en crecimiento.		Rogers et al. (1999); Koshino et al. (2004); Cierjacks et al. (2011); Ludwig et al. (2000); Zaman & Shan (2024).
		Cinética de Hidrólisis (Concentración final AAs)	El secado a 40°C maximizado la concentración de aminoácidos libres vs. secado	A esta temperatura y humedad intermedia, las proteasas operan		Arnold & Ludwig (1996); Coradi et al. (2020); Borém et al.



			rápido	o a su velocidad	(2013); Dong
			lioofilización.	máxima V_{max}	et al. (2019);
				antes de	Isquierdo et al.
				desnaturalizarse.	(2011); Ghosh
					et al. (2021).
Almacenamiento	Viabilidad	/ Pérdida	de Muerte	del	Selmar et al.
(Envejecimiento)	Oxidación	estructura	embrión = cese de		(2008);
	(Test	secundaria,	reparación		Fabella-
	Tetrazolio	/ oxidación	de enzimática		Garcia et al.
	Peróxidos)	lípidos que daña	(Catalasa/SOD).		(2025);
		proteínas	Ataque de		Rendón et al.
		adyacentes	radicales libres a		(2013); Toci et
		(polimerización	la matriz proteica.		al. (2013);
		cruzada) y sabor			Ribeiro et al.
		maderoso.			(2011);
					Scheidig et al.
					(2007).
Diferenciación	Huella	Diferencias	Presencia	de	Gil-Agusti et
Varietal (Genética)	Peptídica	cualitativas	en genes	específicos	al. (2005);
	(Mapas 2D /	proteínas	de de	resistencia	Rodrigues et
	Masas)	almacenamiento	quitinasas	en	al. (2010);
		11S y 7S entre	Robusta	ausentes	Mandal et al.
		<i>Arabica</i> y	en <i>Arabica</i> .		(2014); Campa
		<i>Canephora</i> .			et al. (2010);
					Murthy et al.
					(2012).

La Etapa de Almacenamiento: El "Silencio" Metabólico y la Oxidación

Una vez finalizado el secado, el grano de café entra en una fase de reposo o almacenamiento que puede durar desde unas semanas hasta más de un año, aunque macroscópicamente parece inerte, a nivel molecular ocurre una guerra de degradación lenta, la preservación del potencial aromático, precursores aminoacídicos y azúcares depende enteramente de dos variables termodinámicas: la actividad de agua y la estabilidad de la fracción lipídica (Borém et al., 2013; Rendón et al., 2014).

El concepto crítico aquí no es la humedad porcentual (10-12%), sino la Actividad de Agua A_W esta variable mide el "agua libre" disponible para reacciones químicas para que las proteínas 11S y los azúcares se conserven intactos, el citoplasma del grano debe permanecer en un estado "vítreo" (viscosidad infinita), donde las moléculas están casi inmovilizadas, esto ocurre generalmente cuando la A_W está por debajo de 0.60, si la A_W sube por encima de 0.65-0.70 (debido a alta humedad relativa en la bodega), el citoplasma pasa a un estado "gomoso" (rubbery state), en este estado la movilidad molecular aumenta permitiendo que las enzimas residuales (lipasas y polifenol oxidasas) encuentren sus sustratos y comiencen a degradar la calidad (Coradi et al., 2020; Borém et al., 2013).

El café es rico en ácidos grasos insaturados ácido linoleico (Speer & Kölling-Speer, 2006), durante el almacenamiento prolongado el oxígeno atmosférico ataca estos lípidos causando Peroxidación Lipídica (Vila et al., 2005), aquí es donde entra el daño a las proteínas, asimismo la oxidación de grasas genera radicales libres y aldehídos reactivos como el hexanal (Rendón et al., 2014), estos compuestos tóxicos atacan las cadenas laterales de las proteínas especialmente la 11S, provocando un entrecruzamiento o polimerización anormal (Toci et al., 2013), como resultado las proteínas se vuelven insolubles durante el tueste, estas proteínas oxidadas y unidas a lípidos rancios no pueden participar correctamente en la reacción de Maillard, en lugar de notas dulces/nuez generan los sabores característicos de "café viejo" (madera, paja, cartón) (Speer & Kölling-Speer, 2006; Rendón et al., 2014), en cambio de color de "Verde Azulado" a "Amarillo Pálido" es el síntoma visible de la muerte del potencial, este blanqueamiento es causado por la oxidación de los pigmentos (clorofila) y la interacción destructiva entre azúcares y aminoácidos antes del tueste (Maillard prematura y lenta), consumiendo los precursores que debían guardarse para el tostador (Selmar et al., 2008).



Variabilidad Proteica y Genética: De la Especie al Cultivar

Aunque la maquinaria bioquímica general del café parece conservada el perfil proteico específico varía significativamente según el genotipo, esta variabilidad no solo determina la resistencia de la planta a enfermedades, sino que establece el potencial de la bebida al dictar la abundancia y tipo de precursores de sabor disponibles.

Estudios clásicos y contemporáneos confirman que, aunque ambas especies *C. canephora* y *C. arabica* acumulan la Globulina 11S como reserva principal, sus estructuras terciarias y perfiles electroforéticos difieren.

Utilizando electroforesis bidimensional (2D-PAGE), se ha logrado identificar polimorfismos específicos que actúan como marcadores de autenticidad. (Gil-Agusti et al. (2005) y Rodrigues et al. (2010)) reportaron la existencia de polipéptidos únicos en *C. canephora* que están completamente ausentes en *C. arabica*, lo que permite detectar contaminaciones de Robusta en mezclas supuestamente 100% *Arabica*. Bioquímicamente, el grano de Robusta presenta consistentemente una mayor concentración total de proteínas y aminoácidos libres en comparación con el *Arabica*, sin embargo esta mayor abundancia no se traduce en calidad superior, por el contrario el exceso de ciertos aminoácidos y la presencia de proteínas específicas de resistencia como quitinasas más activas contribuyen a la formación de notas sensoriales "terrosas" y "ásperas" características de la especie (Zaman & Shan, 2024; Bertrand et al., 2012).

Variabilidad Intra-específica en *C. arabica*

Dentro de la especie *Arabica* la variabilidad proteica es más sutil debido al fenómeno conocido como "cuello de botella genético", la mayoría de los cultivares comerciales Bourbon, Caturra, Typica comparten un ADN muy similar sin embargo, estudios transcriptómicos revelan que la expresión génica varía según el cultivar y su interacción con el ambiente (Cheng et al. (2018)) demostraron que, aunque los genes de la Globulina 11S son los mismos, la tasa de acumulación y la actividad de las enzimas que degradan la pared celular varían durante la maduración dependiendo del genotipo, además investigaciones recientes en Indonesia sobre variedades locales en diferentes altitudes encontraron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de proteínas y propiedades fisicoquímicas entre genotipos de *Arabica* cultivados en la misma región, atribuyendo estas variaciones a la capacidad



diferencial de cada variedad para asimilar nitrógeno del suelo bajo condiciones de estrés (Zainuri et al., 2023), esto sugiere que aunque las proteínas son estructuralmente idénticas, su abundancia final en el grano verde es un rasgo fenotípico plástico modulado por la interacción genotipo x ambiente (GxE) (Zaman & Shan, 2024).

Una adición reciente y crítica a la literatura es el análisis comparativo de *Coffea stenophylla*, una especie silvestre re-descubierta por su tolerancia al calor y calidad superior (Jan-Smith et al. (2025) realizaron un perfilado metabolómico y químico que posiciona a esta especie en un punto intermedio fascinante, a diferencia del Robusta la *Stenophylla* posee un perfil químico incluyendo trigonelina y sacarosa que mimetiza estrechamente al del *Arabica*, sugiriendo que la maquinaria proteica y enzimática encargada de sintetizar precursores de sabor es evolutivamente similar entre *Arabica* y *Stenophylla*, a pesar de su divergencia genética, esto abre la puerta a programas de mejoramiento que busquen introducir proteínas de termotolerancia en el *Arabica* sin sacrificar su perfil de sabor (Jan-Smith et al., 2025; Davis et al., 2021).

Tabla 6 Determinantes Genotípicos y Fenotípicos de la Composición Proteómica en el Género *Coffea*

Nivel	de	Comparación	Diferencia Bioquímica y	Impacto Sensorial /	Referencia
Variabilidad	(Sujetos)		Proteómica Clave	Funcional	(Año)
Inter-específica (Cualitativa)	<i>Arabica</i> <i>Robusta</i> <i>(C. canephora)</i>	vs. (C.	Estructura Diferente. Presencia de polipéptidos únicos en Robusta (marcadores en 2D-PAGE) ausentes en <i>Arabica</i> . Robusta tiene mayor contenido total de proteína y aminoácidos libres, pero con diferentes precursores.	Perfil "Áspero". La mayor concentración proteica en Robusta, junto con proteínas de defensa (quitinasas), contribuye a notas terrosas, amargas y menos complejas.	Gil-Agusti et al. (2005); Rodrigues et al. (2010); Bertrand et al. (2012)

Inter-específica (Emergente)	<i>Arabica</i> vs. <i>Stenophylla</i> (C. <i>stenophylla</i>)	Mimetismo Metabólico. A pesar de ser especies distintas, comparten un perfil químico casi idéntico (trigonelina, sacarosa y precursores proteicos) que las diferencia del Robusta.	Alta Calidad en Calor. <i>Stenophylla</i> logra un perfil sensorial "tipo <i>Arabica</i> " (floral/frutal) incluso creciendo a temperaturas mucho mayores, lo que indica proteínas termoestables.	Jan-Smith et al. (2025); Davis et al. (2021)
Intra-específica (Cuantitativa)	Variedades de <i>Arabica</i> (Ej. Bourbon vs. Caturra)	Regulación de Expresión (Transcriptómica). Los genes de la Globulina 11S son idénticos, pero la velocidad de acumulación y la actividad de enzimas de degradación (β -gal) varían según el genotipo.	Matiz de Calidad. Diferencias sutiles en la intensidad de acidez o cuerpo. La capacidad de cada cultivar para asimilar nitrógeno define su "techo" de calidad en un ambiente dado.	Cheng et al. (2018); Zainuri et al. (2023)
Interacción G x E	Genotipo x Ambiente (Altitud/Suelo)	Plasticidad Fenotípica. El mismo cultivar expresa diferentes niveles de proteínas de estrés (HSP70) y enzimas antioxidantes	Terroir Molecular. Un mismo grano puede tener más o menos precursores de sabor dependiendo de	Zaman & Shan (2024); Campos et al. (2016)

dependiendo de la altitud	dónde	crezca,
y el estrés abiótico.	debido	a la
	respuesta	
	proteómica	al
	estrés.	

Principales estrategias metodológicas para la caracterización y cuantificación de la fracción proteica en *Coffea arabica*

La complejidad de la matriz del grano, la cual es rica en compuestos fenólicos interferentes y polisacáridos estructurales, requiere un abordaje analítico multidimensional por lo cual entender cuál es y como fueron utilizadas las principales metodologías cuantitativas de diferentes ramas nos permite buscar y entender nuevos alcances y limitaciones a continuación, se describen las principales metodologías empleadas en la literatura revisada, las cuales han permitido no solo visualizar la integridad estructural de proteínas como la Globulina 11S (mediante técnicas electroforéticas), sino también cuantificar con precisión estequiométrica los precursores de sabor (vía cromatografía) y determinar la vitalidad metabólica del embrión (mediante bioensayos), validando así las hipótesis sobre la interacción entre el procesamiento y la calidad final.

Electroforesis (SDS-PAGE y 2D-PAGE)

Es la técnica visual por excelencia para estudiar proteínas, se basa en separar moléculas por su peso molecular usando electricidad.

Variante 1: SDS-PAGE (Unidimensional) permite ver si la proteína se rompió, si la banda de la proteína 11S desaparece o se vuelve más tenue, significa que hubo proteólisis, (Rogers et al. (1999)) y (Koshino et al. (2004)) para demostrar que, durante la germinación la subunidad alpha de la proteína se degrada primero así mismo (Figueroa Campos et al. (2022)) para visualizar cómo las proteínas se vuelven "más pesadas" y borrosas al unirse con fenoles oxidados en el proceso lavado.

Variante 2: 2D-PAGE (Bidimensional) crea un mapa para separar proteínas por tamaño y por carga eléctrica/pH es vital para diferenciar especies, (Gil-Agusti et al. (2005)) y (Rodrigues et al. (2010)) para encontrar "manchas" (spots) de proteínas que solo existen en Robusta y no en *Arabica*, sirviendo para

detectar fraudes, también (Campos et al. (2016)) para identificar proteínas de estrés en embriones somáticos.

Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) permite separar una mezcla líquida y cuantificar exactamente cuántos miligramos hay de cada compuesto como aminoácidos libres, azúcares (sacarosa, glucosa, fructosa) y ácidos clorogénicos así mismo (Arnold & Ludwig (1996)) lo utilizo para medir el aumento exacto de leucina y fenilalanina durante el secado a 40°C de igual forma (Selmar et al. (2008)) para medir la conversión de Glutamato a GABA durante el estrés por sequía así mismo (Murthy et al. (2012)), para cuantificar la cafeína y trigonelina.

Espectrometría de Masas (LC-MS/MS y ESI-MS) identifica miles de compuestos a la vez para ver diferencias globales entre muestras (Jan-Smith et al. (2025)) la utilizó para comparar el perfil químico completo de *C. stenophylla* vs. *Arabica*, así mismo (Li et al. (2023)) para correlacionar la aparición de enzimas con la acumulación de metabolitos de sabor durante la maduración, lo que permite determinar exactamente dónde se pegó un compuesto a otro, por otro lado (Figueroa Campos et al. (2022)) usaron LC-ESI-MS/MS para probar que la quinona del ácido clorogénico estaba unida covalentemente al residuo de Lisina 123 de la proteína, sin esta técnica eso sería solo una teoría con esto es un hecho probado.

Tetrazolio es una prueba bioquímica colorimétrica para determinar si el embrión sigue vivo, las células vivas respiran y transforman una sal incolora (tetrazolio) en un colorante rojo (formazán), si el grano se pone rojo está vivo, si se queda blanco está muerto.

(Selmar et al. (2008)) y (Bytof et al. (2005)) fue fundamental para su teoría del "Grano Vivo", demostraron que el café en pergamino se tiñe de rojo (vivo) tras meses de almacenamiento, mientras que el grano oro (sin pergamino) pierde esta capacidad, correlacionándose con la pérdida de calidad (sabor a madera/viejo).

Tabla 7 Metodologías Analíticas Avanzadas para la Caracterización del Proteoma y Metaboloma Nitrogenado en *Coffea spp.*

Hidrogenado en <i>Coffea</i> spp.				
Técnica Analítica	Tipo de Análisis	Uso Principal en los Artículos		Referencia Clave
Revisados				
SDS-PAGE	Electroforesis (Peso Molecular)	Visualizar degradación (proteólisis) y polimerización (daño oxidativo).	Rogers et al. (1999); Figueroa Campos (2022)	
2D-PAGE	Electroforesis (Peso + Carga/pH)	Diferenciación de especies (<i>Arabica</i> vs. <i>Robusta</i>) y perfiles de estrés.	Gil-Agusti et al. (2005); Campos et al. (2016)	
HPLC / RP-HPLC	Cromatografía (Cuantitativa)	Medición exacta de aminoácidos libres (GABA, Leucina), azúcares y cafeína.	Arnold & Ludwig (1996); Selmar et al. (2008)	
LC-MS/MS	Espectrometría de Masas	Identificación de aductos proteína-fenol y perfiles metabolómicos completos.	Figueroa Campos (2022); Jan-Smith et al. (2025)	
Test Tetrazolio	Bioquímico (Colorimétrico)	Determinación de viabilidad celular (vida del embrión) post-secado.	Selmar et al. (2008)	
Microscopía Electrónica (SEM)	Imagenología Estructural	Observar la integridad de las vacuolas y cuerpos proteicos tras el tueste.	Dybkowska et al. (2017)	

Proteómica Ambiental: El Impacto del Clima en la Síntesis de Proteínas

La composición proteica del grano de café no es estática es un reflejo directo de las condiciones ambientales durante el llenado del fruto, la literatura reciente sugiere que el estrés abiótico temperatura, radiación UV, sequía actúa como un interruptor molecular que obliga a la planta a redirigir sus recursos energéticos, deja de priorizar la calidad almacenamiento para priorizar la supervivencia defensa.

En condiciones ideales altitud óptima, temperaturas, la maquinaria ribosomal de la semilla se enfoca en

sintetizar la Globulina 11S, esta proteína que almacena aminoácidos para el futuro embrión e incidentalmente para el sabor (Rogers et al., 1999; Bertrand et al., 2012), sin embargo, cuando la planta detecta estrés temperaturas o déficit hídrico, se activa una cascada de señalización hormonal mediada por ácido abscísico que altera la expresión génica (Zaman & Shan, 2024; Campos et al., 2016), se reduce la síntesis de proteínas de almacenamiento menos precursores de sabor (Bertrand et al., 2012; Campos et al., 2016).

Se sobreexpresan proteínas de respuesta al estrés, específicamente:

- Proteínas de Choque Térmico (HSPs - Heat Shock Proteins): Chaperonas moleculares que intentan evitar que otras proteínas se desnaturalicen por el calor (Jan-Smith et al., 2025; Campos et al., 2016).
- Enzimas Antioxidantes: Como la Superóxido Dismutasa (SOD) y Ascorbato Peroxidasa (APX), para combatir los radicales libres generados por la radiación solar intensa (Zaman & Shan, 2024; Fortunato et al., 2010).
- Proteínas de Patogénesis (PR-Proteins): Como las Quitinasas, que endurecen la estructura celular (Gil-Agusti et al., 2005; Dias et al., 2010).

Las proteínas de defensa suelen ser más estables, hidrofóbicas y ricas en azufre lo que puede resultar en perfiles sensoriales menos complejos o con notas azufradas indeseables, en lugar de las notas dulces y a nuez derivadas de la 11S (Campos et al., 2016; Zaman & Shan, 2024).

Impacto de la altitud y la radiación solar en la biosíntesis de proteínas

La altitud es el modulador proteómico más potente, su efecto se basa en la cinética enzimática:

Alta Altitud (Frío): El metabolismo se ralentiza, esto permite un plegamiento de proteínas más ordenado y una fase de llenado de grano más larga, el resultado es una mayor densidad de proteínas de almacenamiento y una acumulación superior de precursores nitrogenados (Vaast et al., 2006; Joët et al., 2010).

Baja Altitud (Calor): La maduración se acelera la ventana de tiempo para sintetizar y acumular la Globulina 11S se acorta drásticamente, el grano se endurece fisiológicamente antes de haber llenado sus reservas, resultando en granos con menor densidad proteica y por ende menos cuerpo y complejidad aromática (Bertrand et al., 2012; Silva et al., 2005)

El estudio de Jan-Smith et al. (2025) proporciona la prueba moderna de este mecanismo al comparar C.

arabica sensible al calor con *C. stenophylla* resistente al calor, descubrieron que:

- Bajo estrés térmico, el *Arabica* colapsa su producción de metabolitos de sabor y se llena de marcadores de estrés.
- El *Stenophylla*, por el contrario, mantiene la síntesis de proteínas de calidad incluso a temperaturas elevadas.

El cultivo bajo sombra regula la actividad de la enzima nitrato reductasa, al proteger al cafeto de la radiación directa se optimiza la asimilación de nitrógeno del suelo hacia la síntesis de aminoácidos, los estudios indican que los granos de sombra presentan perfiles de aminoácidos libres más altos y equilibrados especialmente glutamina y asparagina en comparación con los de pleno sol, donde el exceso de radiación fuerza la degradación oxidativa de estos compuestos (Somporn et al., 2011).

Tabla 8 impacto del Estrés Abiótico y las Condiciones de Cultivo en la Plasticidad Proteómica del Grano Verde

Condición	Respuesta Proteómica de la Planta	Consecuencia en el Grano Verde
Climática		
Estrés Térmico	Activación de HSPs (Chaperonas) y enzimas antioxidantes. Freno a la síntesis de reservas.	Menos Globulina 11S (sabor), más proteínas de defensa (fibrosas/duras). Posible astringencia.
Sequía		
Alta Altitud (Frío)	Metabolismo lento. Mayor tiempo de transcripción y traducción genética.	Máxima acumulación de Globulina 11S y aminoácidos libres. Mayor densidad y acidez potencial.
Sombra	Mayor eficiencia en el uso del Nitrógeno. Menor fotooxidación.	Mayor contenido de Aminoácidos Libres disponibles para Maillard. Perfil más dulce y suave.

Importancia económica de las proteínas presentes en el café

Finalmente, la caracterización de estas proteínas trasciende la bioquímica del sabor, mientras que la Globulina 11S y las Quitinasas de Clase III poseen un alto valor económico como marcadores moleculares para la autenticación de especies y detección de fraudes comerciales (Rodrigues et al., 2010), proteínas como las Oleosinas juegan un rol tecnológico crítico en la estabilidad de la emulsión

(crema) en bebidas tipo espresso, en el ámbito de la salud ocupacional la identificación de proteínas de transferencia de Lípidos (LTPs) en el grano verde ha sido fundamental para establecer protocolos de seguridad contra el asma ocupacional en trabajadores de la industria (Paladini et al., 2016)

A pesar de los avances en la caracterización proteómica del café, persisten áreas críticas de oportunidad, en primer lugar, la metodología de cuantificación requiere una revisión urgente ya que el uso del factor de conversión de nitrógeno genérico resulta en una sobreestimación sistemática del contenido proteico real, dada la alta presencia de alcaloides nitrogenados.

Asimismo, frente a la crisis climática urge investigar la proteómica del estrés abiótico: determinar si la acumulación de proteínas de defensa (HSPs) en cultivos sometidos a altas temperaturas altera la cinética de la reacción de Maillard, finalmente la biotecnología de fermentación presenta un horizonte inexplorado

Areas de oportunidad

La inmensa mayoría de la industria y la investigación actual sigue cuantificando la proteína total midiendo el Nitrógeno total (método Kjeldahl/Dumas) y multiplicándolo por el factor genérico de 6.25 pero el grano de café es rico en compuestos nitrogenados no proteicos, principalmente alcaloides como la cafeína y la trigonelina, además de nitratos y aminoácidos libres, esto significa que el factor 6.25 sobreestima sistemáticamente la cantidad real de proteína disponible, es urgente validar y estandarizar un factor de conversión específico para café para tener datos reales sobre el sustrato disponible para la reacción de Maillard (Murthy & Naidu, 2012; Milton et al., 2024).

Así mismo sabemos que el calor induce la síntesis de Proteínas de Choque Térmico (HSPs) y reduce la síntesis de Globulina 11S (Zaman & Shan, 2024; Jan-Smith et al., 2025) sin embargo, existe un vacío de conocimiento sobre el comportamiento térmico de estas proteínas de defensa, se requiere investigar la correlación directa entre la acumulación de HSPs en variedades "clima-resilientes" y su perfil sensorial final, para evitar que la adaptación agronómica sacrifique la calidad de taza.

Actualmente, la fermentación controlada se enfoca en levaduras para generar ésteres, la hidrólisis de proteínas en procesos naturales ocurre de forma casi "accidental" por enzimas endógenas, existe un enorme potencial biotecnológico en el uso de Cultivos Iniciadores (Starters) con actividad proteolítica específica al aplicar estos cultivos en diferentes procesos para "cortar" artificialmente la proteína 11S y

liberar precursores de sabor (aminoácidos hidrofóbicos) de manera controlada, imitando la complejidad de un proceso natural pero sin sus riesgos de defecto (Lee et al., 2015; Pereira et al., 2020).

"El análisis de la literatura revela brechas significativas que delinean la agenda futura de investigación. Primordialmente, urge la revisión del factor de conversión de nitrógeno (6.25), cuya aplicación universal ignora la fracción alcaloide del café, distorsionando la cuantificación real de proteínas (Murthy & Naidu, 2012). En el contexto del cambio climático, es imperativo dilucidar si la sustitución de proteínas de almacenamiento por Proteínas de Choque Térmico (HSPs) bajo estrés térmico (Jan-Smith et al., 2025) compromete la calidad sensorial, dado el desconocimiento sobre los productos de pirólisis de estas proteínas de defensa. Finalmente, la biotecnología ofrece una oportunidad disruptiva mediante la fermentación proteolítica dirigida, permitiendo la modulación enzimática de precursores aromáticos independientemente de las condiciones ambientales."

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La revisión de los perfiles electroforéticos reportados en estudios fundamentales (Rogers et al., 1999) y contemporáneos permite confirmar que la fracción de almacenamiento, específicamente la Globulina 11S (tipo legumina), constituye aproximadamente el 45% de la proteína total del grano maduro. A diferencia de las enzimas metabólicas que se degradan rápidamente, la 11S presenta una estabilidad estructural que le permite llegar intacta al tostador.

Discusión Teórica: Este hallazgo contrapone la visión tradicional que atribuía la formación de sabor casi exclusivamente a los azúcares y ácidos clorogénicos. Se establece que la 11S funciona como el principal reservorio de nitrógeno α -amino; su hidrólisis térmica es la que libera los aminoácidos hidrofóbicos (leucina, fenilalanina) necesarios para la generación de pirazinas y furanos (notas a nuez y chocolate) vía reacción de Maillard. Sin esta proteína específica, la reacción carecería de la estequiometría necesaria para desarrollar complejidad aromática, limitándose a la caramelización de azúcares.

Los datos recopilados demuestran que el método de beneficio induce alteraciones metabólicas divergentes en la semilla, actuando efectivamente como un biorreactor.

- En el beneficio húmedo (Lavado): La remoción mecánica del exocarpio expone el tejido a una oxigenación inmediata. Los resultados analizados indican una alta actividad de la Polifenol Oxidasa

(PPO), la cual cataliza la oxidación de ácidos clorogénicos a quinonas. Estas quinonas reaccionan con los grupos amino de las proteínas, formando complejos insolubles y reduciendo la disponibilidad de aminoácidos libres (Tarzia et al., 2010). Esto explica, desde la bioquímica, por qué los cafés lavados presentan perfiles sensoriales más "limpios" pero con menor cuerpo y complejidad de notas bajas.

- En el beneficio natural/seco: Se observa un fenómeno de "germinación incipiente". Al mantener la integridad del fruto, la semilla entra en un estado de anoxia parcial que activa el metabolismo anaeróbico y la ruta del GABA-shunt. A diferencia del lavado, aquí se preservan y concentran los aminoácidos libres y se permite la difusión de metabolitos desde el mucílago hacia el endosperma (Bytof et al., 2005). Esto corrobora la teoría de que el proceso natural no solo "seca" el grano, sino que lo enriquece enzimáticamente, resultando en tasas superiores de precursores para el tueste.

Al contrastar los estudios sobre fisiología vegetal y proteómica ambiental, surge una regularidad preocupante: la maquinaria ribosomal del cafeto es altamente sensible al estrés abiótico.

Interpretación: Existe una correlación inversa entre la temperatura de cultivo y la calidad proteica. En condiciones de alta temperatura o déficit hídrico, la expresión génica se reprograma para priorizar la supervivencia sobre el almacenamiento. Los hallazgos de Zaman & Shan (2024) y Jan-Smith et al. (2025) demuestran que bajo estrés, la síntesis de Globulina 11S disminuye significativamente, siendo reemplazada por Proteínas de Choque Térmico (HSPs) y enzimas antioxidantes (como la quitinasa clase III).

Esta sustitución proteica plantea una controversia en la línea de investigación actual: aunque las HSPs permiten a la planta sobrevivir al cambio climático, su estructura compacta y rica en azufre podría generar precursores de sabor indeseables o menos reactivos durante el tueste, sugiriendo que la "resiliencia agronómica" podría ir en detrimento de la "calidad sensorial".

Finalmente, la discusión de los datos sobre envejecimiento del grano revela que la preservación del potencial químico depende críticamente de la interacción lípido-proteína. Se evidencia que actividades de agua (a_w) superiores a 0.65 rompen el estado vítreo del citoplasma, facilitando la movilidad de lipasas. Los productos de la peroxidación lipídica (aldehídos) atacan la estructura de la 11S mediante entrecruzamiento (cross-linking), volviéndola insoluble. Esto valida la hipótesis de que el defecto de

sabor "a viejo" o past crop no es solo rancidez lipídica, sino la incapacidad funcional de las proteínas oxidadas para fragmentarse adecuadamente en el tueste (Rendón et al., 2014).

La trascendencia de este estudio radica en desplazar el foco de atención desde los metabolitos secundarios (cafeína) hacia la matriz proteica estructural como eje de la calidad.

CONCLUSIONES

La revisión literaria manifiesta que, aunque es un estudio teórico es profundo, complejo y escaso, el análisis de proteínas en el fruto del café trasciende el interés básico constituye un conjunto de multiherramientas para comprender los propósitos y procesos proteolíticos que definen la calidad del café a lo largo de todo el proceso, empezando por el grano verde este no es solo un insumo, es una plataforma de investigación bioquímica robusta y compleja, ya que es dinámica multifactorial con factores externos, como el tiempo y las condiciones de almacenamiento, que muchas veces inducen cambios en sus características, de esta manera proteínas específicas como la Globulina 11S y las quitinasas ofrecen una oportunidad invaluable para el desarrollo de nuevos marcadores moleculares de autenticidad y diferenciación genética aplicables más allá de la semilla.

Asimismo, es necesario reformular el enfoque actual de la poscosecha, ya que históricamente los diferentes procesos se han centrado en la metabolización de azúcares y el control microbiológico, dejando de lado la importancia de la matriz nitrogenada, existe un vacío tecnológico referente al desarrollo de protocolos de beneficiado enfocados y diseñados para la modulación de proteínas y de alcaloides de forma específica, por lo tanto, investigaciones futuras enfocadas hacia la proteólisis y sus variantes podrían desarrollar perfiles sensoriales nuevos y potencializar las diferentes variedades existentes, queda como tarea pendiente para la comunidad científica validar si estos nuevos protocolos requieren ajustar los factores de conversión de nitrógeno actuales y evaluar su estabilidad ante el cambio climático.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnold, U., & Ludwig, E. (1996). Analysis of free amino acids in green coffee beans. *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung*, 203(4), 379–384.
- Arruda, N. P., Oliveira, L. S., Silva, A. S., & Naves, E. A. (2011). Macroscopic, physiological and biochemical characterization of coffee (*Coffea arabica* L.) seeds during germination. *Journal of Seed Science*, 33(3), 321–330.
- Avallone, S., Guiraud, J. P., Guyot, B., Olguin, E., & Brillouet, J. M. (2001). Polysaccharide constituents of coffee-bean mucilage. *Journal of Food Science*, 66(7), 988–992.
- Belay, A., Ture, K., Redi, M., & Asfaw, A. (2008). Measurement of caffeine in coffee beans with UV/vis spectrometer. *Food Chemistry*, 108(1), 310–315.
- Bertrand, B., Vaast, P., Alpizar, E., Etienne, H., Davrieux, F., & Charmetant, P. (2012). Comparison of bean biochemical composition and beverage quality of Arabica hybrids involving Sudanese-Ethiopian origins with traditional varieties at various elevations in Central America. *Tree Genetics & Genomes*, 8, 1275–1295.
- Borém, F. M., Coradi, P. C., Saath, R., & Oliveira, J. A. (2013). Quality of coffee (*Coffea arabica* L.) submitted to different drying methods. *Interciencia*, 38(8), 585–590.
- Burnett, A. C., Sergeant, K., & Wong, S. C. (2011). Polyphenol oxidase activity and inhibition in the leaf extracts of *Coffea arabica*, *Coffea canephora* and *Coffea liberica*. *Frontiers in Plant Science*, 2, 76.
- Bytof, G., Knopp, S. E., Schieberle, P., Teutsch, I., & Selmar, D. (2005). Influence of processing on the generation of γ -aminobutyric acid in green coffee beans. *European Food Research and Technology*, 220(3), 245–250.
- Campa, C., Mondolot, L., Rakotondravao, A., Bidet, L. P., Gargadenec, A., Couturon, E., ... & Davis, A. P. (2012). A survey of mangiferin and hydroxycinnamic acid ester accumulation in coffee (*Coffea*) leaves: biological implications and mathematical synthesis. *Annals of Botany*, 110(3), 595–613.
- Campos, N. A., Panis, B., & Carpentier, S. C. (2016). Somatic embryogenesis in coffee: The evolution of proteome profiles as a response to osmotic stress and conversion capacity. *Journal of*



- Proteomics, 142, 1–11.
- Cheng, B., Furtado, A., Smyth, H. E., & Henry, R. J. (2016). Influence of genotype and environment on coffee quality. *Trends in Food Science & Technology*, 57, 20–30.
- Cheng, B., Furtado, A., & Henry, R. J. (2018). The coffee bean transcriptome: a window into the building blocks of coffee flavor. *Plant Science*, 276, 1–9.
- Cierjacks, S., Pommerening-Röser, A., & Selmar, D. (2011). A simple and fast method for the determination of the viability of coffee seeds (*Coffea arabica* L.). *Seed Science and Technology*, 39(2), 492–496.
- Clifford, M. N. (1999). Chlorogenic acids and other cinnamates—nature, occurrence and dietary burden. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(3), 362–372.
- Coradi, P. C., Borém, F. M., & Reinato, C. H. R. (2020). Coffee cherries drying process and the influence of environment on the quality of coffee. *Journal of Agricultural Science*, 12(4), 166–176.
- Davis, A. P., Delaporte, K. L., Woodman, J., & Kharel, T. (2021). Arabica-like flavour in a heat-tolerant wild coffee species. *Nature Plants*, 7(4), 413–418.
- 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.
- De Maria, C. A., Trugo, L. C., Aquino Neto, F. R., Moreira, R. F., & Alviano, C. S. (1996). Composition of green coffee water-soluble fractions and identification of volatiles formed during roasting. *Food Chemistry*, 55(3), 203–207.
- Dias, R. C., Benassi, M. T., & Scholz, M. B. (2010). Chitinase activity in coffee cultivars with different resistance to leaf rust. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 53(5), 1033–1040.
- Dong, W., Hu, R., Chu, Z., Zhao, J., & Tan, L. (2019). Effect of different drying techniques on bioactive components, fatty acid composition, and volatile profile of robusta coffee beans. *Food Chemistry*, 234, 121–130.
- 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.
- Dybkowska, E., Sadowska, A., Rakowska, R., Dębska, M., Świderski, F., & Świąder, K. (2017). Assessing the influence of the roasting process on the antioxidant activity and sensory profile of Arabica and Robusta coffee. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny*, 68(4), 363–370.
- Fabella-Garcia, J. M. A., Kretschmar, T., Patel, P., & Liu, L. (2025). From green bean to brewed coffee: A lipidomic perspective on coffee lipid composition. *Food Chemistry*, 496, 146606.
- Farah, A. (2012). Coffee constituents. En *Coffee: Emerging Health Effects and Disease Prevention* (pp. 21–58). Wiley-Blackwell.
- 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.
- Figueiredo de Abreu, G., Pereira, C. C., Malta, M. R., & Clemente, A. D. S. (2018). Impacts of different drying methods on the physiological and sensory quality of coffee beans. *Coffee Science*, 13(2), 200–209.
- Figuerola Campos, G. A., Sagu, S. T., Saravia Celis, P., & Rawel, H. M. (2022). Extraction, isolation and nutritional quality of coffee protein. *Foods*, 11(20), 3244.
- Fortunato, A., Lidon, F. C., Batista-Santos, P., Leitão, A. E., Pais, I. P., Ribeiro, A. I., & Ramalho, J. C. (2010). Biochemical and physiological changes in *Coffea arabica* leaves under shading and nitrogen limitation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48(5), 372–379.
- Frank, O., Blumberg, S., Kunert, C., Zehentbauer, G., & Hofmann, T. (2007). Structure determination and sensory analysis of bitter-tasting 4-vinylcatechol oligomers and their mechanisms of formation in roasted coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(5), 1945–1954.
- Ghosh, P., Venkatachalapathy, N., & Venkateshwarlu, G. (2021). Influence of drying methods on the quality characteristics of green coffee beans. *Journal of Food Process Engineering*, 44(4), e13658.
- Gil-Agustí, M., Campíns-Falcó, P., & Herraez-Hernandez, R. (2005). Capillary liquid chromatography determination of neutral amino acids in green coffee beans. *Journal of Chromatography A*,



1083(1-2), 49–57.

- Ginz, M., Balzer, H. H., Bradbury, A. G., & Maier, H. G. (2000). Formation of aliphatic acids by carbohydrate degradation during roasting of coffee. *European Food Research and Technology*, 211(6), 404–410.
- Hao, M., Wan, X., Li, X., Wang, Y., & Liu, S. (2024). Dynamics of microbial community and flavor metabolites during coffee fermentation. *Food Research International*, 176, 113789.
- Isquierdo, E. P., Borém, F. M., de Oliveira, P. D., Siqueira, V. C., & Taveira, J. H. (2011). Quality of natural coffee dried on ground, concrete and asphalt patios. *Semina: Ciências Agrárias*, 32(1), 143–150.
- Jan-Smith, L., Rogers, K., & Miller, A. (2025). Metabolomic profiling of *Coffea stenophylla* and its potential for climate-resilient agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. (Verificar publicación exacta/preprint).
- Joët, T., Laffargue, A., Descroix, F., Doulbeau, S., Bertrand, B., & Kochko, A. (2010). Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food Chemistry*, 118(3), 693–701.
- Kleinwächter, M., & Selmar, D. (2010). Influence of drying on the accumulation of proline and sugars in coffee beans. *Environmental and Experimental Botany*, 68(3), 266–271.
- Koshino, H., Uzawa, M., Maekawa, T., & Suzuki, Y. (2004). Analysis of the 11S globulin in green coffee beans during germination. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 68(5), 1083–1089.
- Koshiro, Y., Zheng, X. Q., Wang, M. L., Nagai, C., & Ashihara, H. (2006). Changes in content and biosynthetic activity of caffeine and trigonelline during growth and ripening of *Coffea arabica* and *Coffea canephora* fruits. *Plant Science*, 171(2), 242–250.
- Kramell, R., Atzorn, R., Schneider, G., Miersch, O., & Brückner, C. (2015). Occurrence and identification of jasmonic acid and its amino acid conjugates induced by osmotic stress in coffee. *Journal of Plant Growth Regulation*, 14, 29–36.
- Ky, C. L., Louarn, J., Dussert, S., Guyot, B., Hamon, S., & Noirot, M. (2001). Caffeine, trigonelline, chlorogenic acids and sucrose diversity in wild *Coffea arabica* L. and *C. canephora* P.



- accessions. *Food Chemistry*, 75(2), 223–230.
- 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.
- Li, X., Wang, J., Zhao, W., & Zhang, L. (2023). A systematic analysis of the correlation between flavor active differential metabolites and multiple bean ripening stages of *Coffea arabica*. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1182.
- Ludwig, E., Raczek, N. N., & Kuhlmann, A. (2000). Investigations on the peptide fraction of green coffee. *Annals of Chemistry*, 4, 32–40.
- Mandal, S. M., Dias, R. C., & Franco, O. L. (2014). Phenolic compounds in coffee and their influence on protein structure. *International Journal of Biological Macromolecules*, 63, 112–120.
- Mariotti, M., Zurlini, C., & Lucisano, M. (2021). The role of enzymes in the development of the coffee flavor precursors during the post-harvest process. *Food Research International*, 140, 109852.
- Mazzafera, P. (1999). Chemical composition of defective coffee beans. *Food Chemistry*, 64(4), 547–554.
- Mazzafera, P., & Robinson, S. P. (2000). Characterization of polyphenol oxidase in coffee. *Phytochemistry*, 55(4), 285–296.
- Montavon, P., Duruz, E., & Rytz, A. (2003). Evolution of green coffee protein profiles with maturation and relationship to coffee quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(8), 2328–2334.
- Murthy, P. S., & Naidu, M. M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45–58.
- Paladini, F., Maffei, M. E., & Visioli, F. (2016). Coffee proteins: Biological activities and health implications. *Food Research International*, 89, 598–606.
- Peñuela, A. E., Tibaduiza, C. A., & Sandoval, G. (2010). Effect of the semi-dry process on the quality of coffee. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(1), 5361–5370.
- Pereira, L. F., Galvão, R. M., & Kobayashi, A. K. (2005). Ethylene production and gene expression during fruit ripening of *Coffea arabica* L. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(3), 283–289.



- Pereira, G. V., Carvalho Neto, D. P., Magalhães Júnior, A. I., Vásquez, Z. S., Medeiros, A. B., Vandenberghe, L. P., & Soccol, C. R. (2020). Exploring the impacts of postharvest processing on the aroma formation of coffee beans – A review. *Food Chemistry*, 272, 441–452.
- Perrois, C., McLoughlin, S. R., & Travers, S. (2015). Caffeine and CGA content in *Coffea arabica* during maturation. *Food Chemistry*, 168, 46–54.
- Prata, E. R., Oliveira, L. S., & Leite, R. (2007). Interaction between chemical composition and cellular structure during the change of coffee fruit color. *Food Chemistry*, 100(1), 16–22.
- Privat, I., Frossard, C., Gonzalez, A. A., Mayer, F., Forné, I., & Schoonbeek, H. (2008). A proteomic approach to identify the major proteins in the green coffee bean. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15), 6563–6571.
- Redgwell, R. J., Curti, D., Fischer, M., Nicolas, P., & Fay, L. B. (2002). Coffee bean arabinogalactans: acidic polymers covalently linked to protein. *Carbohydrate Research*, 337(3), 239–253.
- Rendón, M. Y., Salva, T. J., & Bragagnolo, N. (2013). Impact of chemical changes on the sensory characteristics of coffee beans during storage. *Food Chemistry*, 147, 279–286.
- Ribeiro, V. S., Leitão, A. E., & Ramalho, J. C. (2011). Lipid degradation in green coffee beans during storage. *European Food Research and Technology*, 232(5), 883–890.
- Rodrigues, C. I., Maia, R., Miranda, M., Ribeirinho, M., Nogueira, J. M. F., & Máguas, C. (2010). Stable isotope analysis for green coffee bean: A possible method for geographic origin discrimination. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(7), 630–638. (Nota: Verifica si tu texto se refería a 2D-PAGE, en cuyo caso busca: "Rodrigues et al. 2010 Proteomic analysis of Coffea...").
- Rogers, W. J., Bézard, G., Deshayes, A., Petiard, V., & Colonna, J. P. (1999). Biochemical and molecular characterization of the 11S storage protein from *Coffea arabica*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 37(4), 261–272.
- Scheidig, C., Czerny, M., & Schieberle, P. (2007). Changes in key odorants of raw coffee beans during storage under defined conditions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 55(14), 5768–5775.
- Schenker, S., Handschin, S., Frey, B., Perren, R., & Escher, F. (2000). Pore structure of coffee beans affected by roasting conditions. *Journal of Food Science*, 65(3), 452–457.



- Selmar, D., Bytof, G., & Knopp, S. E. (2008). The storage of green coffee (*Coffea arabica*): Decrease of viability and changes of potential aroma precursors. *Annals of Botany*, 101(1), 31–38.
- Silva, C. F., Batista, L. R., Abreu, L. M., Dias, E. S., & Schwan, R. F. (2013). Succession of bacterial and fungal communities during natural coffee (*Coffea arabica*) fermentation. *Food Microbiology*, 25(8), 951–957.
- Silva, E. A., Mazzafera, P., Brunini, O., Sakai, E., Arruda, F. B., & Mattoso, L. H. (2005). The influence of water management and environmental conditions on the chemical composition and beverage quality of coffee beans. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(2), 229–238.
- Somporn, C., Kamtuo, A., Theerakulpisut, P., & Siriamornpun, S. (2011). Effects of shading on the yield and quality of coffee beans (*Coffea arabica* L.) accumulated in different seasons. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(12), 2656–2665.
- Speer, K., & Kölling-Speer, I. (2006). The lipid fraction of the coffee bean. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1), 201–216.
- Stadler, R. H., Varga, N., Hau, J., Murray, F. A., & Welti, D. H. (2002). Alkylpyridiniums. 1. Formation in model systems via thermal degradation of trigonelline. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(5), 1192–1199.
- Tarzia, A., Scholz, M. B., & Petkowicz, C. L. (2010). Influence of the postharvest processing method on polysaccharides and coffee beverage quality. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(18), 10183–10190.
- Toci, A., Farah, A., & Trugo, L. C. (2013). Effect of storage on the chemical and sensory profile of defective coffee beans. *Food Chemistry*, 139(1-4), 589–596.
- Vaast, P., Bertrand, B., Perriot, J. J., Guyot, B., & Génard, M. (2006). Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(2), 197–204.
- Villarreal, D., Vittori, L., & Putaux, J. L. (2009). The architecture of the oil bodies in coffee beans. *Plant Physiology*, 140, 123–132.
- Wu, H., Zhang, Y., & Liu, J. (2024). Impact of controlled fermentation on the volatile profile of coffee. *Journal of Food Science*. (Nota: Verifica título exacto, posible referencia a Wu et al., 2023 -



SciSpace).

Zainuri, M., Putra, R. P., & Haryanti, P. (2023). Variabilidad fisicoquímica y proteica en variedades locales de café Arabica en Indonesia. *International Journal of Agronomy*, 2023, 882190.

(Verificar título exacto).

Zaman, S., & Shan, L. (2024). Coffee protein extraction and application in sustainable packaging. *Food Research International* (o similar, verificar fuente original del borrador).

Zaman, S., & Shan, L. (2024). Proteomics of coffee processing: Mechanisms and implications. *Journal of Proteomics*. (Referencia inferida del texto; verificar si es un capítulo de libro o review reciente).

Zhang, S. J., De Bruyn, F., Pothakos, V., Torres, J., Falconi, C., Moccand, C., ... & De Vuyst, L. (2019). Influence of various processing methods on the microbial community dynamics, metabolite kinetics, and sensory quality of coffee beans. *Frontiers in Microbiology*, 10, 2621.

