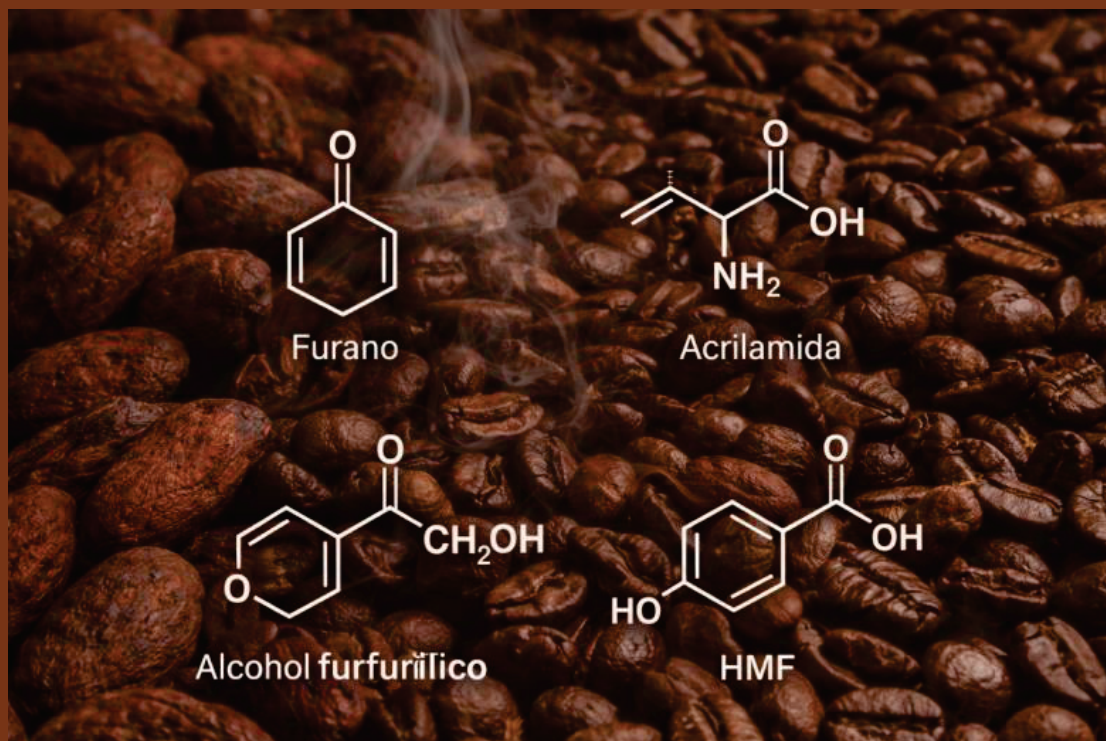


Estrategias para la mitigación de contaminantes neoformados en cacao y café tostados en el departamento del Huila



AUTORES

Claudia Milena Amorocho Cruz, Carlos Edwin Carranza Gutiérrez, Yeison Fernando Barrios, María Elena Medina Orjuela,
Joel Girón Hernández, Shirley Rocío Vargas Paredes, Nelson Gutiérrez Guzmán, Miguel Ángel Díaz Herrera,
Jessica Jiménez Ochoa, Federman Betancourt Sambony, Hasleidy Malena Cortes Gutiérrez, Daniela Quizá Roa,
Karen Tatiana Salas Calderón, Germán Danilo Gómez, Rubén Darío Meneses Sánchez

Grupo de investigación:

Agroindustria USCO – GICAFAT – FENIX



Estrategias para la mitigación de contaminantes neoformados en cacao y café tostados en el departamento del Huila

AUTORES:

*Claudia Milena Amorocho Cruz, Carlos Edwin Carranza Gutiérrez,
Yeison Fernando Barrios, María Elena Medina Orjuela,
Joel Girón Hernández, Shirley Rocío Vargas Paredes,
Nelson Gutiérrez Guzmán, Miguel Ángel Díaz Herrera,
Jessica Jiménez Ochoa, Federman Betancourt Sambony,
Hasleidy Malena Cortes Gutiérrez, Daniela Quizá Roa,
Karen Tatiana Salas Calderón, Germán Danilo Gómez,
Rubén Darío Meneses Sánchez*

Grupo de investigación:

Agroindustria USCO – GICAFAT – FENIX





UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)

Jaime Alberto Leal Afanador

Rector

Constanza Abadía García

Vicerrectora académica y de investigación

Leonardo Yunda Perlaza

Vicerrector de medios y mediaciones pedagógicas

Edgar Guillermo Rodríguez Díaz

Vicerrector de servicios a aspirantes, estudiantes y egresados

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres.

Vicerrector de relaciones intersistémicas e internacionales

Martha Viviana Vargas Galindo

Vicerrectora de inclusión social para el desarrollo regional y la proyección comunitaria

Jordano Salamanca Bastidas

Decano Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Sandra Rocío Mondragón

Decano Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios

Juan Sebastián Chiriví Salomón

Líder Nacional del Sistema de Gestión de la Investigación (SIGI)

Martín Gómez Orduz

Líder Sello Editorial UNAD



UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA (USCO)

Rubén Darío Valbuena Villareal

Rector

Leonardo Herrera Mosquera

Vicerrector académico

Claudia Andrea Ramírez Perdomo

Vicerrectora de Investigación y Proyección Social

Ramiro Díaz

Vicerrector Administrativo

Joanna Constanza Mitchell Hernández

Jefe de Oficina de Relaciones Nacionales e internacionales

Jhenny Lorena Amaya Gorron

Dirección Administrativa de Bienestar Universitario

Marlio Bedoya Cardoso

Decano Facultad de Ingeniería

Fernando Galindo Perdomo

Dirección Editorial y de Publicaciones

664.07 Amorocho Cruz, Claudia Milena
A524

Estrategias para la mitigación de contaminantes neoformados en cacao y café tostados en el departamento del Huila / Claudia Milena Amorocho Cruz, Carlos Edwin Carranza Gutiérrez, Yeison Fernando Barrios ... [et al.] -- [1.a. ed.]. -- Bogotá: Sello Editorial UNAD; Neiva, Huila: Editorial Universidad Surcolombiana/2026. (Grupos de investigación Agroindustria USCO, GICAFAT y FENIX).

ISBN: 978-628-7857-62-9

e-ISBN: 978-628-7857-63-6

1. Contaminantes alimentarios 2. Café 3. Cacao 4. Tostado de alimentos 5. Tecnología de alimentos 6. Procesamiento de alimentos 7. Contaminantes neoformados 8. Acrilamida 9. Furano 10. Hidroximetilfurfural 11. Fermentación 12. Análisis de alimentos 13. Inocuidad alimentaria 14. Riesgos para la salud 15. Mitigación de contaminantes I. Amorocho Cruz, Claudia Milena II. Carranza Gutiérrez, Carlos Edwin III. Barrios, Yeison Fernando IV. Medina Orjuela, María Elena V. Girón Hernández, Joel VI. Vargas Paredes, Shirley Rocío VII. Gutiérrez Guzmán, Nelson VIII. Díaz Herrera, Miguel Ángel IX. Jiménez Ochoa, Jessica Paola X. Betancourt Sambony, Federmán XI. Cortés Gutiérrez, Hasleidy Malena XII. Quizá Roa, Daniela XIII. Salas Calderón, Karen Tatiana XIV. Gómez, Germán Danilo XV. Meneses Sánchez, Rubén Darío.

Catalogación en la publicación – Biblioteca Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Estrategias para la mitigación de contaminantes neoformados en cacao y café tostados en el departamento del Huila

Autores: Claudia Milena Amorocho Cruz, Carlos Edwin Carranza Gutiérrez, Yeison Fernando Barrios, María Elena Medina Orjuela, Joel Girón Hernández, Shirley Rocío Vargas Paredes, Nelson Gutiérrez Guzmán, Miguel Ángel Díaz Herrera, Jessica Jiménez Ochoa, Federmán Betancourt Sambony, Hasleidy Malena Cortes Gutiérrez, Daniela Quizá Roa, Karen Tatiana Salas Calderón, Germán Danilo Gómez, Rubén Darío Meneses Sánchez.

Grupo de investigación: Agroindustria USCO – GICAFAT – FENIX

ISBN: 978-628-7857-62-9

e-ISBN: 978-628-7857-63-6

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios

©Editorial Sello Editorial UNAD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Calle 14 sur No. 14-23

Bogotá, D.C.

©Facultad de Ingeniería.

Editorial Universidad Surcolombiana.

Sede Central Avenida Pastrana Borrero, Av. 26 con Carrera primera Neiva, Huila.

Septiembre de 2026

Corrección de textos: OPR DIGITAL SAS

Diseño de portada: OPR DIGITAL SAS

Diagramación: OPR DIGITAL SAS

Impresión: OPR DIGITAL SAS

Declaración uso de IA: Empleo de chatgpt como corrector de estilo previo a la revisión editorial.

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons – Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



CONTENIDO

Reseña del libro.....	9
Reseña de los autores.....	11
Agradecimientos.....	15
Prólogo.....	17
Capítulo 1.	
Estado actual de las empresas tostadoras de café y cacao en el departamento del Huila	19
Capítulo 2.	
Caracterización de compuestos neoformados (NFCs) en café y cacao: formación, comparación y evaluación de riesgos	53
Capítulo 3.	
Validación de técnicas analíticas para la cuantificación de NFCs en cacao y café tostado: garantizando precisión y fiabilidad	79
Capítulo 4.	
Cinética de los compuestos neoformados durante el proceso de tostado en café y cacao	115
Capítulo 5.	
Metodologías de mitigación de compuestos de neoformados	141
Capítulo 6.	
Plan de acción y estrategias de fortalecimiento de la cadena de producción de café y cacao tostado.....	199

RESEÑA DEL LIBRO

Esta obra se deriva de los resultados del proyecto de investigación BPIN 2020000100438 “Investigación y desarrollo de estrategias para la mitigación de contaminantes neoformados en cacao y café tostados en el departamento del Huila” financiado con recursos del Sistema General de Regalías y en alianza entre la Universidad Surcolombiana y la Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

El libro se estructura en seis capítulos, donde se recopilan los resultados en los componentes de caracterización de las empresas tostadoras de café y cacao, la cuantificación de los compuestos neoformados, la cinética y las estrategias de mitigación.

En el primer capítulo se describe el estado actual de las empresas tostadoras de café y cacao en su componente de información empresarial, aspectos de mercadeo, procesamiento del producto y aspectos legales.

En el segundo capítulo se presenta la caracterización de compuestos neoformados (NFCs) en café y cacao: formación, comparación y evaluación de riesgos.

En el tercer capítulo está la validación de técnicas analíticas para la cuantificación de NFCs en cacao y café tostado, garantizando precisión y fiabilidad.

En el cuarto capítulo, se muestra la Cinética de los compuestos neoformados durante el proceso de tostado en café y cacao.

En el quinto capítulo están las estrategias de mitigación de compuestos neoformados con microorganismos durante el proceso de fermentación en cacao y café.

En el sexto capítulo se presenta el plan de acción y estrategias de fortalecimiento de la cadena de producción de café y cacao tostado.

RESEÑA DE LOS AUTORES

Claudia Milena Amorocho Cruz

Ph.D. en Biotecnología de la Universidad Politécnica de Valencia-España, Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Profesora titular, Programa de Ingeniería Agrícola, Universidad Surcolombiana, Investigadora Senior (Minciencias). Integrante de los grupos de investigación Agroindustria USCO y GHIDA de la Universidad Surcolombiana, Neiva, Huila. *Correo electrónico:* claudiamilena.amorocho@usco.edu.co. <https://orcid.org/0000-0003-3986-5768>

Carlos Edwin Carranza Gutiérrez

Ph.D.(c) Ciencias Agrarias-Fisiología de Cultivos e Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia. Docente del Programa de Agronomía de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), CEAD José Acevedo y Gómez (Bogotá). Investigador Junior (Minciencias). Líder del Grupo Interinstitucional de Investigación en Ciencias Agropecuarias, Forestales y Agroindustriales del Trópico Colombiano (GICAFAT), Categoría A Minciencias. *Correo electrónico:* carlos.carranza@unad.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-7125-7191>

Yeison Fernando Barrios

Ingeniero Agrícola de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana (Neiva-Huila). Magister en Ciencias de la Ingeniería Química y Bioprocesos de la Pontificia Universidad Católica de Chile (Santiago, Chile). Doctorando en Ciencia, Tecnología y Gestión Alimentaria en la Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España). Integrante del Grupo de Investigación Agroindustria USCO de la Universidad Surcolombiana y del grupo i-FOOD de la universidad Politécnica de Valencia. *Correo electrónico:* Yeison.barrios@usco.edu.co; yfbarrod@upv.es. <https://orcid.org/0000-0001-6244-8773>

María Elena Medina Orjuela

Ingeniería Química, profesional de apoyo proyecto. *Correo:* medinao.mariae@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0003-2412-7391>

Joel Girón Hernández

Ph.D. y M.Sc. Ciencia e Ingeniería de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia (España), Ingeniero Agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor asistente de Northumbria University (Newcastle upon Tyne, UK). Investigador

asociado (Minciencias). *Correo electrónico*: joel.l.g.hernandez@northumbria.ac.uk.
<https://orcid.org/0000-0003-1245-4475>

Shirley Rocío Vargas Paredes

Ph.D.(c) Administración de Organizaciones de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Magíster en Administración de Organizaciones. Especialista en Gerencia Estratégica de Mercadeo. Especialista en Educación Superior a Distancia. Administradora de Empresas. Investigador Junior (Minciencias). Docente del Programa de la Maestría de Organizaciones de la Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios (ECACEN), CCAV Neiva (Huila) y líder del Sistema de Gestión de la Investigación de la Zona Sur. *Correo electrónico*: shirley.vargas@unad.edu.co.
<https://orcid.org/0000-0002-6224-9341>

Nelson Gutiérrez Guzmán

Ph.D. en Tecnología de Alimentos y M.Sc. en Ingeniería de Alimentos de la Universidad Politécnica de Valencia. Ingeniero Agrícola de la Universidad Surcolombiana. Profesor titular. Coordinador de la Maestría en Ciencia y Tecnología del Café y Director del Centro Surcolombiano de Investigación en Café (CESURCAFE) de la Universidad Surcolombiana. Investigador Senior (Minciencias), Neiva (Huila). *Correo electrónico*: ngutierrezg@usco.edu.co. <https://orcid.org/0000-0003-2499-8066>

Miguel Ángel Díaz Herrera

Ph.D. en ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Lavras, M.Sc. En Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia. Ingeniero Mecánico de la Universidad Antonio Nariño. Profesor Programa de Ingeniería Agrícola, integrante del Grupo Agroindustria USCO, Universidad Surcolombiana. Neiva (Huila). *Correo electrónico*: miguelddiaz@usco.edu.co. <https://orcid.org/0000-0001-9768-3044>

Jessica Paola Jiménez Ochoa

Ingeniera Agrícola de la Universidad Surcolombiana e integrante del Grupo Agroindustria USCO, Neiva (Huila). *Correo electrónico*: jessica.jimenez@usco.edu.co.
<https://orcid.org/0000-0001-6877-5994>

Federman Betancourt Sambony

Ingeniero Agrícola de la Universidad Surcolombiana, e integrante del Grupo Agroindustria USCO, Neiva (Huila). *Correo electrónico*: Federman.betancourt@usco.edu.co. <https://orcid.org/0009-0006-8361-0075>

Hasleidy Malena Cortés Gutiérrez

Agrónoma de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), CCAV Neiva (Huila) e Integrante del Semillero HORTIFOREST. *Correo electrónico*: hmcortesg@unadvirtual.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-8499-6049>

Daniela Quizá Roa

Agrónoma de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) e Integrante del

Semillero HORTIFOREST, CCAV Neiva (Huila). *Correo electrónico*: dquizar@unadvirtual.edu.co. <https://orcid.org/0009-0006-5748-7827>

Karen Tatiana Salas Calderón

Estudiante de Agronomía de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA) de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), e Integrante del Semillero HORTIFOREST, CCAV Pitalito (Huila). Ingeniera Agrícola de la Facultad de ingeniería de la Universidad Surcolombiana e integrante del Grupo de Investigación Agroindustria USCO. *Correo electrónico*: ktsalasc@unadvirtual.edu.co. <https://orcid.org/0000-0002-0468-8151>

Germán Danilo Gómez

Ingeniero Agrícola de la Universidad Surcolombiana, Neiva (Huila). *Correo electrónico*: germandanilogomez@gmail.com. <https://orcid.org/0009-0001-1646-8236>

Rubén Darío Meneses Sánchez

Ingeniero Agrícola de la Universidad Surcolombiana, Neiva (Huila). *Correo electrónico*: ruben.meneses@usco.edu.co. <https://orcid.org/0009-0007-8291-6037>

AGRADECIMIENTOS

Los autores del libro agradecen al equipo administrativo del proyecto conformado por Daniel Castro (coordinador) y Shirley Calderón Torres (profesional de apoyo) por su liderazgo para el desarrollo de las actividades y gestión de los recursos. Asimismo, expresamos un especial agradecimiento a los caficultores y cafeteros del departamento del Huila en Colombia, quienes suministraron las muestras conforme a lo establecido y dispusieron de su tiempo para responder las encuestas aplicadas. Su valiosa participación fue fundamental y contribuyó de manera significativa al logro de los objetivos del proyecto.

PRÓLOGO

El café y el cacao son líneas importantes de producción en el departamento del Huila, se destaca la generación de empresas tostadoras de diferentes tamaños y de naturaleza jurídicas y naturales, distribuidas en todo el departamento para la generación de productos con valor agregado y venta a diferentes destinos nacionales e internacionales. En esta obra los autores abordarán los diferentes aspectos de la transformación de los productos desde su caracterización, la poscosecha, la fermentación y el tostado de café y cacao.

Durante el proceso de tostado en cacao y en café permite la aparición de atributos organolépticos únicos como aromas, colores y sabores. La formación de estos compuestos se deriva principalmente de la reacción de Maillard (MR) que ocurre entre los grupos carbonilo de azúcares reductores y los grupos amino de aminoácidos, péptidos o proteínas, dando lugar a una mezcla particularmente compleja de varios compuestos de diferentes pesos moleculares como aldehídos, cetonas, melanoidinas y dicarbonilos. Sin embargo, durante este proceso también se generan otros tipos de compuestos denominados contaminantes neoformados (NFC), entre los que se encuentran la acrilamida (AA), el furano y el hidroximetilfurfural (HMF), presentes en alimentos procesados a altas temperaturas. Los NFC pueden generar efectos perjudiciales para la salud humana por la presencia de estos contaminantes en los productos tostados, por lo cual en países como Estados Unidos y Europa han desarrollado normatividad para su etiquetado, niveles de referencia para reducir su presencia y el riesgo de su consumo.

El desarrollo de investigaciones en torno a la identificación de contaminantes neoformados en el tostado de café y cacao, contribuye a contar con una línea base para el departamento del Huila y en Colombia y el desarrollo de estrategias de mitigación para la reducción de estos compuestos a partir del uso de microorganismos durante la fermentación para la disminución de los precursores que generan estos contaminantes y manteniendo las características organolépticas.

*Claudia Milena Amoroch Cruz
Yeison Fernando Barrios
Carlos Edwin Carranza Gutiérrez*

Capítulo 1

Estado actual de las empresas tostadoras de café y cacao en el departamento del Huila

Current Status of Coffee and Cocoa Roasting Companies in the Department of Huila

Resumen

El departamento del Huila lidera la producción de cafés especiales en Colombia y ocupa la cuarta posición en cacao, destacándose en mercados internacionales por su calidad y aroma. No obstante, existe un vacío de información sobre el nivel tecnológico y los procesos de las empresas tostadoras. Esta investigación tuvo como objetivo caracterizar y tipificar dichas empresas en función de su información empresarial, estrategias de mercadeo, procesamiento del producto y cumplimiento legal, facilitando así el diseño de planes de mejora. Se realizó un estudio con 45 empresas (32 de café y 13 de cacao) distribuidas en las regiones norte, occidente, centro y sur del departamento. Se aplicó una encuesta de 50 preguntas divididas en cuatro categorías clave. Los datos obtenidos se procesaron mediante análisis descriptivos, multivariados, de correspondencia y de clúster jerárquico. En los resultados se encontraron que existen diferencias significativas en la estructura organizacional entre las tostadoras de cacao y las de café; en el sector cacaotero, se identificó una necesidad crítica de intervención en los procesos de transformación, específicamente en la fermentación. El análisis multivariado permitió clasificar a las organizaciones en grandes, medianas y pequeñas. Las variables determinantes para esta categorización fueron el número de empleados y su nivel académico. Este estudio proporciona una base sólida para la prospectiva tecnológica, permitiendo impulsar acciones concretas que fortalezcan la competitividad de la agroindustria en el Huila.

Palabras clave: *empresas tostadoras, café, cacao, caracterización empresarial, tipificación.*

Abstract

The department of Huila leads the production of specialty coffees in Colombia and ranks fourth in cocoa production, standing out in international markets for its quality and aroma. However, there is an information gap regarding the technological level and processes of roasting companies. This research aimed to characterize and categorize these companies based on their business information, marketing strategies, product processing, and legal compliance, thereby facilitating the design of improvement plans. A study was conducted with 45 companies (32 coffee and 13 cocoa) distributed across the northern, western, central, and southern regions of the department. A 50-question survey, divided into four key categories, was administered. The data obtained were processed using descriptive, multivariate, correspondence, and hierarchical cluster analyses. The results revealed significant differences in organizational structure between cocoa and coffee roasters; within the cocoa sector, a critical need for intervention in transformation processes—specifically fermentation—was identified. Multivariate analysis allowed for the classification of organizations into large, medium, and small. The determined variables for this categorization were the number of employees and their academic level. This study provides a solid foundation for technological foresight, enabling concrete actions to strengthen the competitiveness of the agribusiness in Huila.

Keywords: *roasting companies, coffee, cocoa, business characterization, typification.*

Introducción

En el mercado mundial, la producción y el comercio del café y el cacao como productos agrícolas primarios son de gran importancia económica, dado que son dos de los productos de mayor consumo, destacados por su calidad, sabor y aroma.

El cacao es una materia prima de gran valor en todo el mundo para elaborar cacao en polvo, chocolate y productos de confitería. El cacao y sus productos son apreciados por su aroma, color y propiedades beneficiosas para la salud. La calidad sensorial del cacao en polvo es crucial para su aplicación en la industria alimentaria, siendo la fermentación y el tostado pasos clave en el desarrollo del sabor (Sari *et al.*, 2026; Alvarado *et al.*, 2023). El mercado del chocolate está presentando una tendencia de crecimiento y diversificación debido a los cambios en el consumo (Becerra *et al.*, 2024), con una creciente demanda de chocolates orgánicos, veganos, sin azúcar y sin gluten, así como de características diferenciadoras como el cacao de aroma fino de origen único, procesos controlados de producción desde el grano hasta la barra y tonos rojo-rosados en el chocolate (Cadby *et al.*, 2021).

Otras de las tendencias en el mercado del chocolate es el aumento de chocolates artesanales generados por pequeñas empresas, que promocionan su propia marca y distribución (Vidal *et al.*, 2019). La demanda de cacao de sabor fino en regiones como Europa y América del Norte está experimentando un crecimiento sustancial. Los granos de gama ultra y alta se utilizan para chocolates gourmet. Los granos regulares

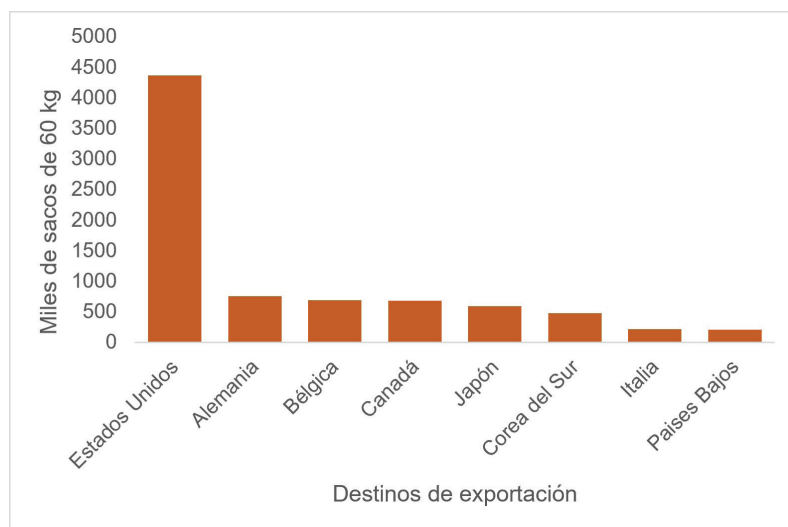
y de menor calidad se utilizan para chocolates premium regulares, especialmente en países como el Reino Unido, Brasil, Estados Unidos, China, India, Países Bajos, Alemania y Suiza. Este desarrollo está impulsado por la tendencia hacia la salud y la búsqueda de productos más exclusivos. El mercado del cacao premium, con certificación de sostenibilidad y origen único, acelera el crecimiento general del mercado (Mordor Intelligence, 2023).

Producción de café y cacao en Colombia

El área cafetera colombiana para 2023 corresponde a 841.350 ha, con una producción de 11.342.000 sacos y un rendimiento de 13,48 sacos/ha, de los cuales se exportaron 1.030.000 sacos de 60 kg (FEDECAFE, 2024). En la economía campesina, más de 500.000 familias, con un núcleo de 4 a 6 personas, sostienen su permanencia en el campo gracias a la producción de café. Estas familias están ubicadas en 23 departamentos y 604 municipios, demandando aproximadamente 2,5 millones de empleos directos e indirectos.

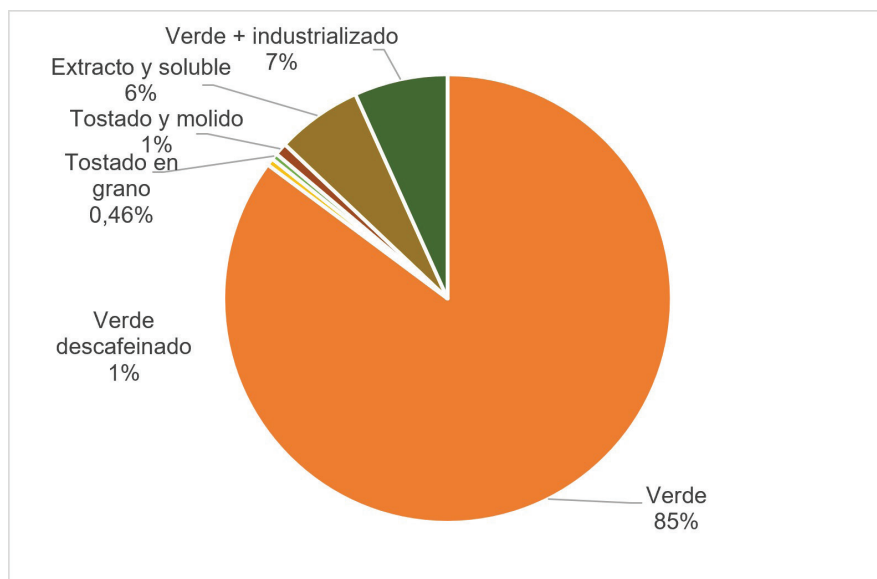
En 2023 se exportaron 10.579.302 sacos de 60 kg de café verde (FEDECAFE, 2024). Los principales destinos de exportación del café fueron Estados Unidos (41,31%), Alemania (7,14%), Bélgica (6,53%), Canadá (6,42%), Japón (5,57%), Corea del sur (4,52%), Italia (2,02%) y los Países Bajos (1,95%) (Figura 1).

Figura 1. Destinos de exportación del café verde



Fuente: elaboración propia.

En las exportaciones por tipo, se destacan el café verde (85%), el café verde + industrializado (7%), extracto y soluble (6%), tostado y molido (1%), verde descafeinado (1%) y tostado en grano (1%) (Figura 2).

Figura 2. Exportaciones de café por tipo

Fuente: elaboración propia.

En relación con la producción de cacao en Colombia FEDECACAO (2023) reportó que, para 2022 la producción nacional fue de 62.106,76 t, para los departamentos de Santander (36,87%), Arauca (16,94%), Antioquia (8,35%), Caldas (7,92%), Tolima (5,8%), Huila (5,66%), Nariño (5,43%), Meta (3,75%), Cesar (3,23%), Cundinamarca (2,6%), Norte de Santander (1,83%) y Boyacá (1,62%), y registró una exportación de 6.044,1 t, de cacao en grano. Además, existe producción de este fruto en los departamentos de Casanare, Guaviare, Valle del Cauca, Magdalena y La Guajira (Quintana-Fuentes *et al.*, 2018).

Producción de café y cacao en el Huila

En el departamento del Huila, para 2022, se registró un área de producción de 145.740 ha (FEDECAFE, 2024), lo que lo convierte en el principal productor de café del país. Además, el 74% de la población rural se dedica a la caficultura, conformados por 84.000 familias campesinas cultivadoras de café arábico de las variedades Castillo, Colombia, Caturra, Típica, Borbón y Tabí, lo que genera alrededor de 101.000 empleos directos.

El departamento del Huila se ubica en el sexto puesto nacional con una producción de 3.518 t, con un área sembrada de cerca de 7.000 ha de cacao, distribuidas en 35 municipios. El cacao es una actividad productiva del sector agropecuario de la cual derivan su sustento alrededor de 3.300 familias en el departamento del Huila, con una importante inclusión de género, de acuerdo con datos de FEDECACAO tras

realizar una caracterización en el 2021, de los 2.606 productores, 736 son mujeres (Gobernación del Huila, 2022).

Los 35 municipios productores de café y cacao del departamento del Huila han posicionado al Huila como el primer productor de cafés especiales y el sexto en cacao en el país. La mayor área cultivada se encuentra en los municipios de Pitalito, Garzón, Gigante, Palestina, Acevedo, San Agustín, Isnos, Saladoblanco, Elías, Timaná, Suaza, Guadalupe, Altamira, Tarqui, Oporapa, La Argentina, La Plata, Pital, Agrado, Paicol, Tesalia, Nátaga, Yaguará, Íquira, El Hobo, Campoalegre, Algeciras, Teruel, Santa María, Palermo, Rivera, Neiva, Tello, Baraya, y Colombia. Estas actividades productivas contribuyen significativamente al desarrollo económico y social del departamento del Huila.

Características de consumo del café y cacao

El incremento de la producción y exportación del café y el cacao se debe al consumo de los colombianos. En relación al café el consumo aumento en un 96% desde el año 2021, una de las principales razones es su calidad y componentes, los cuales en cuanto a la salud de los consumidores generan efectos beneficiosos, por lo tanto, se debe tener en cuenta la edad, sus hábitos dietéticos, la salud actual de la persona, la frecuencia del consumo de café, entre otros factores, para llevar a cabo un consumo moderado y de esta manera formar parte de un estilo de vida saludable. Un consumo moderado de café se asocia con diversos beneficios para la salud.

Algunos efectos en la salud del consumidor incluyen la mejoría del rendimiento cognitivo, la reducción de la presión arterial, la resistencia a la insulina y el control del peso corporal. Además el consumo de café, se relaciona con la disminución del riesgo de enfermedades cardiovasculares, diabetes mellitus tipo 2, cáncer, enfermedades hepáticas y neurológicas. Asimismo, el consumo también está asociado con una reducción del riesgo de melanoma, cáncer cutáneo, cáncer de mama y cáncer de próstata (Gómez *et al.*, 2021).

El cacao estimula neurotransmisores como la dopamina, sustancia química que interviene en los receptores del placer del cerebro y cuya función es mejorar el movimiento, la memoria, la atención, el aprendizaje, el estado de ánimo, combate la depresión, y aumenta el rendimiento físico; como también que la serotonina conocida como la hormona de la felicidad tiene influencia en la regulación del apetito, alivia la angustia y la ansiedad, combate la tristeza, la depresión y es precursora del estado de tranquilidad de las personas (Ferrer, 2019).

Por lo anterior, para garantizar sus beneficios se debe tener en cuenta que el consumidor debe llevar a diario un consumo moderado tanto para café como para cacao. Asimismo, es fundamental cumplir con los protocolos en el procesamiento de estos productos ya que en estos se pueden formar sustancias que tienen diversos

efectos para la salud, formadas durante el procesamiento de alimentos térmicos a altas temperaturas (condición óptima para su formación) como bien sabemos el café y el cacao se lleva a cabo por medio de distintos rangos de temperaturas, según el tipo de producto que se quiera obtener. Por esta razón, es importante cumplir con las normas de inocuidad, así como controlar el grado de tostado, el origen, los procedimientos de cosecha, poscosecha, la transformación de los granos, las tecnologías, entre otros aspectos, para evitar la formación de estos compuestos.

Estas producciones son una gran fuente de ingresos para los agricultores, ya que generan de recursos para solventar sus necesidades familiares, sus cultivos, emprendimientos, e industrias, fortaleciendo el crecimiento económico por medio de las exportaciones debido a su excelente calidad organoléptica de las distintas variedades cultivadas. En el ámbito social, la caficultura y la cacaocultura involucran a un gran porcentaje de la población de diferentes regiones y localidades, fomentando el desarrollo social de las comunidades, el arraigo de la población gracias a la generación de empleo en las zonas rurales y urbanas.

Empresas tostadoras de café y cacao

En un estudio realizado por Chaves (2009) se caracterizó a los integrantes de la Industria Torrefactora Nacional, a partir de una muestra de 65 empresas, desde la óptica de su estructura organizacional, describiendo las premisas de su direccionamiento y el desempeño de las pequeñas empresas tostadoras colombianas, diagnosticando el mercado de café procesado en Colombia por medio del perfil representativo de las industrias tostadoras las cuales están constituidas alrededor de 7 personas (3 en áreas administrativas y 4 operativas) con canales de distribución locales y especializados, donde el mercado de café procesado en Colombia se encuentra fuertemente concentrado en 10 empresas, las cuales abarcan más del 90% del total de las ventas.

Por otra parte, Velásquez-Martínez & Cuestas-González (2018) caracterizaron a las empresas por medio de entrevistas relacionadas a la información corporativa, la información productiva y la información comercial, además de realizar un análisis DOFA, teniendo en cuenta la situación actual del sector cafetero en Colombia, se propuso mejorar su estructura organizacional, por medio de estrategias que conduzcan al mejoramiento de sus procesos y permitan asumir el reto de internacionalizarse buscando el aprovechamiento de las oportunidades del mercado. Estos estudios podrían replicarse en otros casos de pequeñas empresas colombianas.

A nivel internacional, Guerra (2025) mediante un estudio analítico desde el hábitat biológico-cultural en las organizaciones, analizó la relación entre la inteligencia, memoria organizacional y las competencias creadas a través de la Inteligencia colectiva en 84 torrefactoras de café venezolanas. El estudio surgió ante la ausencia de estructuras acordes con la producción y capitalización del saber con el fin de

construir conocimientos organizacionales. Se evidencio en los resultados que solo el 25% de las torrefactoras analizadas están orientadas a la gestión del talento humano, han creado estructuras organizativas coherentes con la participación de sus empleados en proyectos de innovación e I+D, formación continua, inversión en formación del personal directivo. Además, cuentan con una memoria organizacional relacionadas con registro de perfiles competitivos, registros en la evolución del producto, archivos y procesamiento de información sobre mercado.

Estos antecedentes a nivel nacional e internacional evidencian la importancia de obtener información de las empresas que realizan la transformación de los granos de café y cacao con el fin de disminuir las brechas de investigación. En el proceso de recolección de información, estas herramientas facilitan la descripción, gestión y control de los procedimientos a través de la identificación de los elementos esenciales detectando aspectos de mejora, junto con la determinación de las necesidades presentes en las industrias, con el fin de generar oportunidades para el desarrollo de la actividad económica, la eficiencia en las operaciones de las empresas y en los procesos de tostado del café y del cacao. De esta manera, las empresas podrán alcanzar sus objetivos e incrementar su producción por medio de alternativas y estrategias que promuevan la competitividad de la producción cafetera y cacaotera, manteniendo su posición dentro del mercado y consolidándose cada vez más como el mayor productor de café y cacao a nivel nacional. No obstante, en relación con el cacao, el departamento del Huila no ha demostrado un incremento significativo en los últimos años, a diferencia del café que sigue liderando la producción en el transcurso del tiempo.

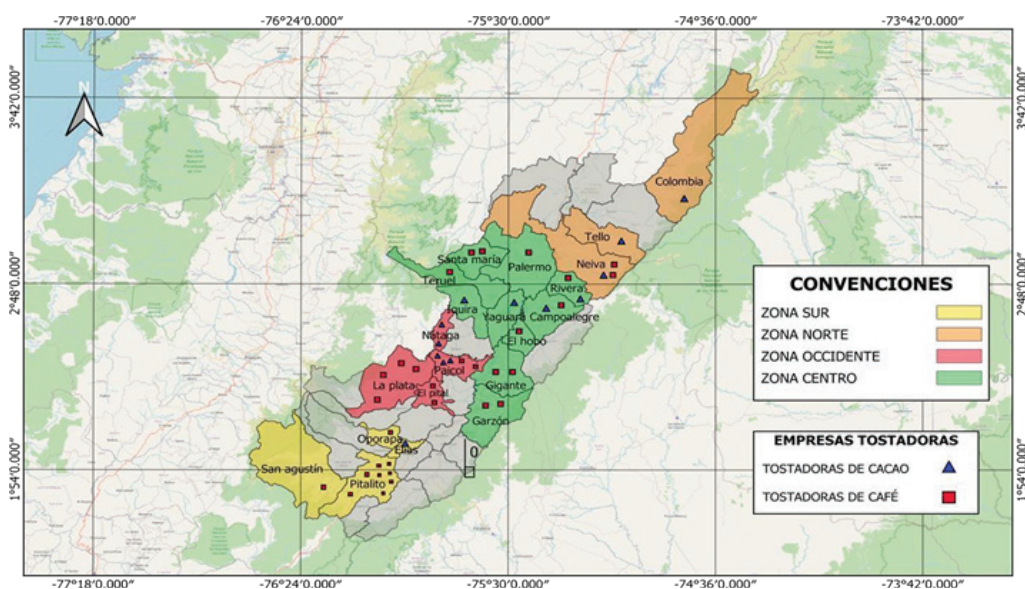
Situación actual de las empresas tostadoras de café y cacao en el Huila

Se realizó una encuesta con cuatro componentes y 50 preguntas: información empresarial (10 preguntas), mercadeo (8 preguntas), procesamiento del producto (17 preguntas) y aspectos legales (15 preguntas). Las preguntas comprendidas en la categoría de información empresarial se enfocaron en obtener información general de la empresa como ubicación, datos de contacto, redes sociales y tiempo de creación de la empresa. En la segunda categoría, mercadeo, las preguntas estuvieron orientadas a conocer el componente teleológico, plan de mercadeo, organigrama, cantidad y tipo de personal contratado, formación de los funcionarios, información de capacitaciones acerca del proceso de tostado y alianzas estratégicas.

En la tercera categoría, procesamiento del producto, se buscaba conocer si la empresa contaba con trazabilidad de la muestra antes de su ingreso al proceso de tostado, procedencia de la materia prima, datos importantes como la extensión (ha) y altitud de las fincas proveedoras, los procesos poscosecha aplicados, tipo de café que compra la empresa, proyecciones de compra mensual, condiciones de almacenamiento, parámetros de tostado (temperaturas, curvas de tostado, tiempo de desgasificación, pruebas de catación) y los respectivos controles de calidad.

Las empresas tostadoras de café y cacao se encuentran distribuidas en las cuatro zonas del departamento del Huila (Figura 3), donde se encuentran ubicadas 13 empresas tostadoras de cacao y 32 empresas de café.

Figura 3. Empresas tostadoras de café y cacao en el departamento del Huila



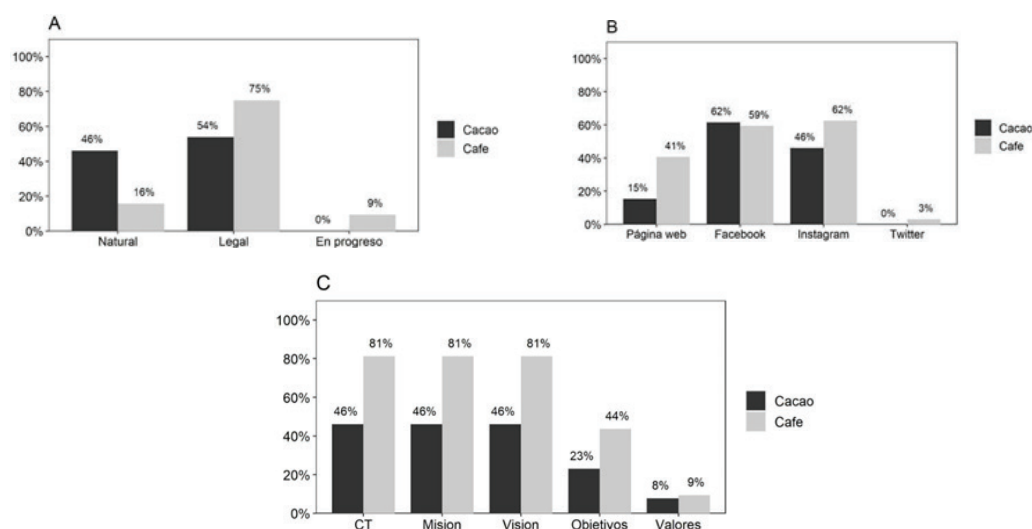
Fuente: elaboración propia.

En los resultados de la caracterización se encontró que la mayoría de las empresas tostadoras de cacao y café tienen representantes jurídicos en un 54% y 75% respectivamente (Figura 4A). La mayoría de las empresas tostadoras de cacao hacen uso principalmente de la red social Facebook (62%), seguida por Instagram (46%) y sitios web (15%), para promocionar y visualizar sus productos de cacao, y el fortalecimiento de la comunicación con nuevos clientes. En el caso de las empresas tostadoras de café predomina el uso de Instagram (62%), seguido por Facebook (59%) y sitios web (41%) (Figura 4B). Algunas empresas tostadoras tienen poco uso de las redes sociales, debido al conocimiento básico y falta de capacitación e innovación en el uso de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC).

El uso de las TIC y las redes sociales, ha demostrado tener una incidencia en el valor agregado en la cadena del café, generando mayores ingresos al productor, un mejor producto y mejores precios al consumidor final, como también se resalta el intercambio de información entre las empresas y los actores que conforman la cadena, obteniendo ventajas competitivas y beneficios. No obstante, para esto se debe diseñar estrategias que incorporen el uso de las TIC en las empresas (López & González, 2012).

En el componente teológico, las empresas tostadoras de cacao tienen constituido su componente teológico en relación con su misión, visión un 46% y las empresas tostadoras de café un 81% (Figura 4C), destacando que las empresas tostadoras de café presentaron en relación con sus objetivos y valores un 44% y 9% a diferencia de las empresas tostadoras de cacao que obtuvieron un 23% y 8%. El establecimiento de estos componentes en las empresas tostadoras permite la gestión organizacional en aspectos de planeación de metas a corto, mediano y largo plazo, el diseño de estrategias de crecimiento junto a correctos procesos y una estructura definida que marcan la ruta del accionar de la empresa.

Figura 4. Información empresarial. **A.** Representación legal de las empresas tostadoras de cacao y café. **B.** Redes sociales utilizadas para la comercialización del cacao y café tostado. **C.** Componente teológico (TC) en las diferentes empresas tostadoras.

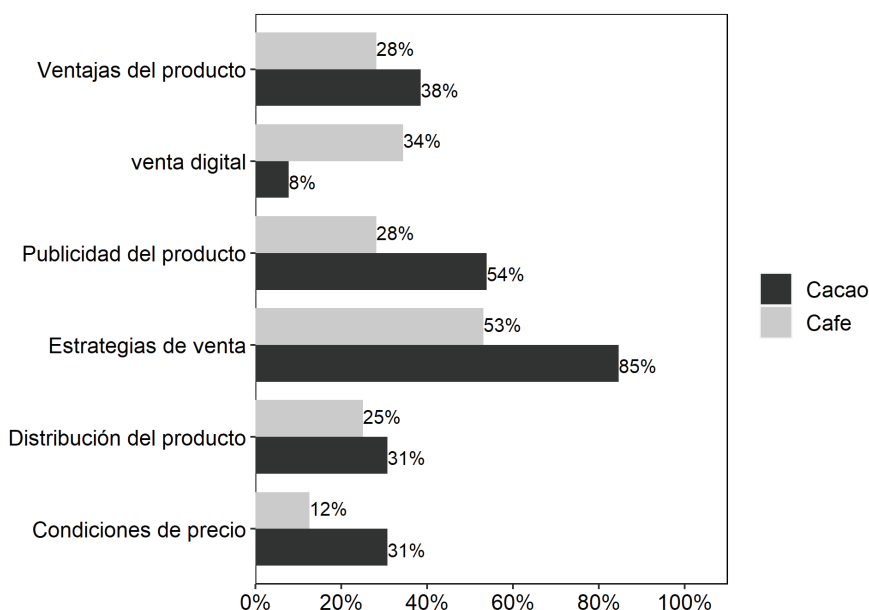


Fuente: elaboración propia.

En cuanto a las estrategias de venta de cacao y café, el 85% de las empresas tostadoras de cacao realizan diversas estrategias de venta, frente a un 53% de las empresas tostadoras de café (Figura 5). Se resalta que en cacao la estrategia más

fortalecida es la publicidad de productos (54%) y en café las ventas digitales (34%). El uso de nuevas alternativas tecnológicas de información y comunicación generan un valor agregado a las actividades operacionales. Mediante la innovación y el diseño de planes estratégicos se generan la creación de nuevos productos, oportunidades, se fortalece la interacción con potenciales clientes nacionales e internacionales y por ende la evolución, el crecimiento y la competitividad empresarial. Asimismo, estas estrategias permiten mejorar la comercialización de los productos e incrementar las exportaciones a diferentes mercados (Bernal-Jiménez & Rodríguez-Ibarra, 2019).

Figura 5. Descripción de las estrategias de ventas implementadas en las empresas tostadoras de cacao y café en Huila-Colombia



Fuente: elaboración propia.

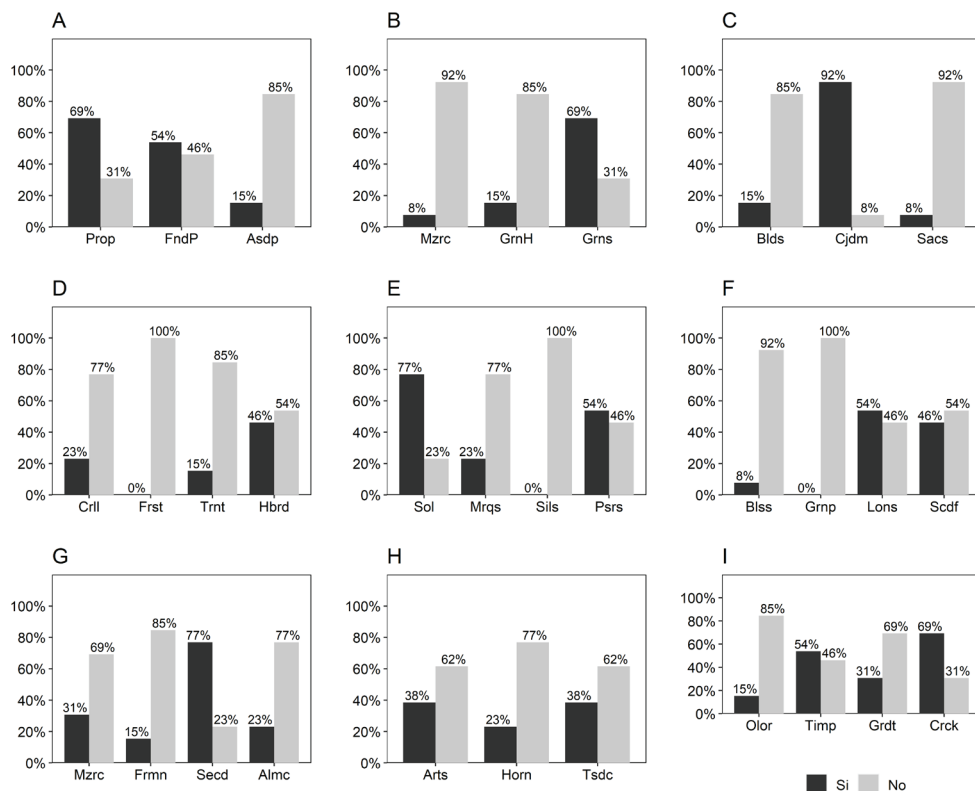
Procesamiento de los granos de cacao y café en Huila, Colombia

En el procesamiento de cacao más del 50% de la materia prima proviene de fincas de productores externos y propios, y solo un 15% de asociaciones de productores (Figura 6A). En la realización de la caracterización de empresas tostadoras de café, se evidencio que la gran mayoría de las empresas tostadoras son naturales-artesanal por ende sus integrantes son los mismos productores de materia prima, quienes han constituido sus emprendimientos con integrantes de su mismo vínculo familiar (familias campesinas) los cuales no están fortalecidos y cuyo proceso de desarrollo es más lento.

De acuerdo con Morales-Intriago *et al.* (2018) en los procesos de comercialización del cacao existe gran cantidad de intermediarios, conllevando a una disminución de

los precios afectando principalmente al productor, quien debe contar con diversas alternativas para que no se vea afectado el productor. Es de resaltar que cuando el productor realiza la comercialización de su materia prima por medio de asociaciones, recibe un valor mayor que cuando se realiza por medio de intermediarios, debido a que en estas asociaciones se llevan a cabo capacitaciones, procesos de fortalecimiento y estrategias de mejora continua. En cuanto a la compra del cacao las empresas tostadoras prefieren adquirirlo en grano seco (69%) (Figura 6B). La adquisición del

Figura 6. Caracterización del procesamiento del cacao. **A.** Caracterización del procesamiento del cacao en función de la procedencia. **B.** Tipos de compra del cacao. **C.** Proceso de fermentación. **D.** Variedades comercializadas. **E.** Tipo de secado implementado. **F.** Material de almacenamiento después del secado. **G.** Etapas de presencia de hongos en el cacao. **H.** Tipo de tostado realizado. **I.** Indicadores de finalización de tostado.



Fuente: elaboración propia. **Conversiones:** Almc: Almacenamiento; Arts: Artesanal; Asdp: Asociación de productores; Blids: Baldes; Blss: Bolsas; Cjdm: Cajones de madera; Crck: Craqueo; Crll: Criollo; FndP: Finca de productores; Frmn: Fermentación; Frst: Forastero; Grdt: Grados de tostado; GrnH: Grano húmedo; Grnp: Grainpro; GrnS: Grano seco; Hbrd: Híbrido; Horn: Horno; Lons: Lonas; Mrqs: Marquesinas; Mzrc: Mazorca; Olor: Olor; Prop: propio; Psrs: Paseras; Sacs: Sacos; Scdf: Sacos de fique; Secd: Secado; Sils: Silos; Sol: Sol; Timp: Tiempo; Trnt: Trinitario; Tsdc: Tostadoras de cacao.

grano seco permite ahorrar etapas como limpieza, clasificación, fermentación y secado, las cuales conllevan gastos adicionales para la obtención del producto final.

En relación con el proceso de fermentación, el 92% de los productores indicó que se realiza en cajones de madera (Figura 6C), con preferencia por madera tipo cedro y nogal para su elaboración, a diferencia de otros materiales como el plástico y acero, los productores eligen los cajones de madera por su fácil acceso, bajo costo, el volumen que permiten fermentar, y su tiempo de vida útil (mayor a 10 años) (Figura 7A). De acuerdo con Ríos-Jara & Lévano-Rodríguez (2022) la madera permite el buen funcionamiento de la fermentación, el desarrollo de sabor de los granos, calidad del grano, debido a que mantiene un nivel óptico de temperaturas (evitando desniveles). Por tanto este tipo de fermentadores son los más utilizados para la realización de procesos del grano tanto en la ejecución de estudios e investigaciones.

Figura 7. Procesamiento del cacao. **A.** Cajones fermentadores de madera. **B.** Secadores de cacao al sol



Fuente: elaboración propia. **Foto:** Malena Cortes (2023).

Un proceso importante para garantizar la calidad de los granos de cacao es el tiempo de uso, limpieza de los fermentadores, adecuado tratamiento, y las prácticas aplicadas relacionadas con la higiene. En general se encontró que algunos fermentadores son usados por un largo periodo de tiempo (aproximadamente 15 años), realizando procesos de limpieza en seco, lo cual no garantiza que se retire la totalidad del material de la anterior fermentación. Esto es relevante, debido a que mantener una buena inocuidad e higiene en el proceso de fermentación contribuye a minimizar la contaminación, disminuyendo los riesgos de pérdida de calidad.

Por otro lado, el 46% de las empresas tostadoras de cacao compran principalmente cacao de la variedad híbrida, y menos del 23% compra variedad criollo y trinitario (Figura 6D). Se ha reportado que variedades híbridas de cacao pueden presentar mayor concentración de humedad que el cacao tipo criollo por lo que la fermentación se da más rápido en la mezcla al tener una mayor actividad de agua y el proceso finaliza con mejores resultados (González-Orjuela, 2021). Bastos *et al.* (2019) señalan que la variedad de cacao híbrida se ha caracterizado por ser de mayor productividad, y tener mayor resistencia a la *Moniliophthora perniciosa* y *Phytophthora spp.*, causantes de las infecciones conocidas como *witches broom* y *Ceratocystis wilt*, pero también que esta variedad mantiene la calidad tradicional del grano y su sabor de chocolate obtenidos en los procesos de fermentación.

Posterior a la etapa de fermentación, se realiza el secado de los granos de cacao para reducir la humedad hasta niveles, entre el 6,0-7,0%. El 77% de las empresas tostadoras de cacao realizan el proceso de secado del grano extendido al sol, 54% lo hace en paseras y un 23% en marquesinas (Figura 6E, 7B). Se evidencia que el procesamiento de secado en la región no ha incorporado tecnologías necesarias para garantizar una buena calidad del grano durante el secado, donde se garantice un buen proceso. Para esto es necesario contar con medidas, controles, tecnologías necesarias para su realización, ya que el secado se debe realizar de manera lenta y con diversos controles. Un secado lento asegura que salgan los ácidos que se encuentran dentro del grano (ácido acético y ácido láctico) y no generen resistencia para salir a la superficie. Sin embargo, si se realiza demasiado lento se pueden formar hongos internos y externos, lo que implica la pérdida de la calidad del cacao. Por otro lado, se recomienda usualmente realizar una buena remoción con el fin de lograr una homogeneidad en el secado a todos los granos de cacao, de manera que estos se sequen al mismo tiempo (Cerón *et al.*, 2020).

Finalizado el secado los granos son almacenados hasta el momento de ser tostados o procesados. Este almacenamiento se realiza sobre tablas en un espacio techado, con el fin de evitar que el cacao absorba humedad debido a su alta higroscopicidad. El material más utilizado para el empaque de los granos secos de cacao son costales de fibra (54%) y sacos de fique (46%) (Figura 6F). De acuerdo con Vesga *et al.* (2022), quienes desarrollaron estrategias para la predicción de condiciones ambientales

durante el proceso de almacenamiento del cacao, mencionaron que este tipo de materiales evita la aparición de mohos debido a que el material permite al grano respirar y mantener su humedad. Por ende, es de gran importancia realizar controles y monitoreos de las condiciones del grano durante su almacenamiento (tanto en el material de empaque como el lugar de almacenamiento) para garantizar que el grano no se deteriore. Por otro lado, es recomendable el uso de bolsas tipo GrainPro en el almacenamiento del cacao, las cuales están hechas de múltiples capas de polietileno (PE). Los granos almacenados en ambiente hermético no se dañan, los insectos no pueden sobrevivir ni consumir lo que está almacenado, los productos se mantienen frescos, las semillas mantienen su vigor y su capacidad de germinación. Un aspecto importante del almacenamiento hermético es que no se necesitan productos químicos, para el control de los insectos (IICA, 2014).

Figura 8. Almacenamiento de granos de cacao



Fuente: elaboración propia. **Foto:** Malena Cortes (2023).

En este sentido, los resultados evidenciaron que la etapa con mayor presencia de hongos es el secado (77%) (Figura 6G), lo cual se puede deber a los altos contenidos de humedad ($>8\%$). La presencia de los mohos influye en el rendimiento del cacao, así como en su aroma y sabor, reduciendo su valor, lo que repercute las ganancias del productor. Por lo tanto, se debe evaluar la calidad física, química y sensorial de los granos, lo que permitirá identificar defectos. La identificación de los granos defectuosos permitirá descartarlos de la evaluación sensorial para evitar riesgos relacionados con la inocuidad alimentaria (Álvarez-Fernández, *et al.*, 2022).

En cuanto al tostado, el 38% de las empresas realizan el proceso de tostado del cacao en máquinas tostadoras (Figura 9A, B, C, D), mientras que otro grupo lo realiza de forma artesanal (Figura 9E, F, G, H) en sartenes u otros utensilios y un 23% utiliza hornos (Figura 6H). El alto porcentaje del tostado artesanal está relacionado con que la gran mayoría de las personas que realizan este proceso son pequeños productores independientes (familias campesinas que manejan sus cultivos) siendo esta una actividad realizada desde hace años, donde se ha identificado un bajo desarrollo tecnológico.

Figura 9. Proceso de tostado del cacao. **A.** Separador de impurezas. **B y C.** Tostadoras de cacao. **D.** Máquina descascarilladora. **E.** Molino. **F y G.** Descascarillado manual. **H.** Elaboración de chocolate manual y chocolate en bola artesanal



Fuente: elaboración propia. **Foto:** Malena Cortes (2023).

En una investigación de desarrollo tecnológico para la cadena productiva de cacao-chocolate en Colombia se evidenció que debido al bajo desarrollo tecnológico presente en los emprendimientos dedicados al tueste del cacao, esto conlleva a una baja cantidad y calidad del producto ya que no cuentan con tecnología disponible para el tostado (Castellanos *et al.*, 2007), siendo este uno de los principales problemas que enfrenta el procesamiento del cacao y la producción de chocolate.

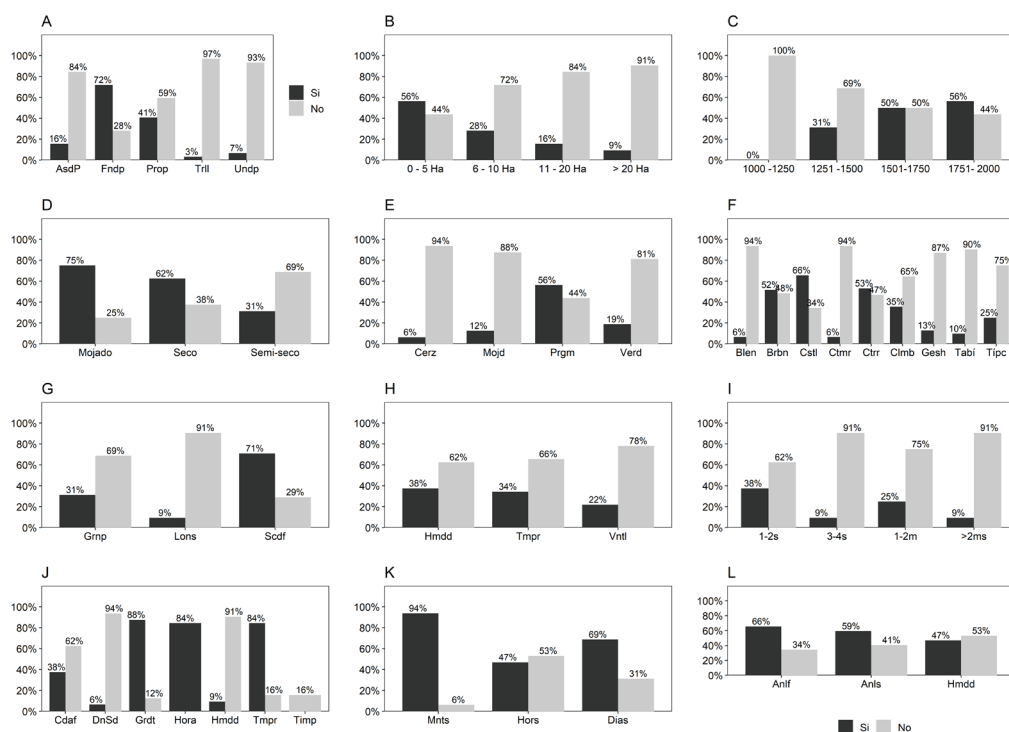
Por lo anterior, es muy importante que se fomente la participación y la creación de estrategias para el mejoramiento y fortalecimiento de las tecnologías a lo largo de toda la cadena de valor cacao-chocolate, teniendo en cuenta que el tostado es una etapa del procesamiento que induce importantes cambios físicos, químicos, estructurales y sensoriales tales como el desarrollo del sabor, color, aroma y textura. Sin embargo, Sandoval (2020) señala que en el tostado el manejo incorrecto de las variables como temperatura, velocidad de aire y tiempo de exposición conduce a la obtención de sabores y texturas desagradables, como puede ser el sabor a quemado, además de una textura blanda, color indeseable, la pérdida de los aromas del cacao producido y, consecuentemente, la disminución de las características deseables en productos derivados como el chocolate.

Con el fin de mantener la calidad, para determinar la finalización de la etapa de tostado se han establecido diferentes indicadores como el color del grano (grado de tostado), el tiempo de tostado, temperatura o el crack. Los resultados evidencian que en un 69% de las empresas tostadoras tienen como un indicador importante de la finalización del tostado el crack del grano (Figura 6I), combinado con otros parámetros como el tiempo (54%). El crack es una evidencia del rompimiento de la estructura del grano originada por una combinación de grandes cantidades de agua que se evaporan y la expansión de los gases de vapor dentro del grano, por lo que es un indicador importante relacionado también con la calidad sensorial del producto final.

En el café se evidenció que el 72% del café adquirido proviene de fincas productoras de caficultores (Figura 10A). Esto se debe a que el precio pagado a las fincas productoras cafeteras es menor en comparación a otras fuentes, para luego ser revendido a un precio más alto, beneficiando a los compradores, pero no a los productores. En este sentido es necesario mejorar la cadena de suministro del café para beneficiar a los productores y a los demás miembros de la cadena que realizan el mayor esfuerzo para la producción de café especial.

La mayoría de las fincas productoras de café (56%) en el departamento, presentan una extensión de alrededor de 0 a 5 ha, siendo inferior al promedio a nivel nacional (6,4 ha) (Figura 10B). El tamaño reducido de las fincas productoras de café en el Huila está asociado a factores culturales, económicos, y territoriales, siendo heredades de generación en generación (creadas por las propias familias). Por otro lado, más del 50% de estas fincas se encuentran cultivadas a una altitud de 1.500-1.750 msnm en las diferentes zonas del departamento del Huila (Figura 10C). Puerta (2015) menciona que la altitud del cafetal influye en el desarrollo de plagas y enfermedades y favorece algunos defectos del grano. A mayores altitudes, por encima de 1.600 m, se ha observado menor cantidad de granos dañados por la broca y una menor cantidad total de defectos.

Figura 10. Caracterización del procesamiento del café. **A.** Procedencia. **B.** Extensión (Ha) del origen donde se cultiva el café. **C.** Altitud en la que se cultiva el café. **D.** Procesos de poscosecha del café. **E.** Forma en la que se compra el café. **F.** Tipo de variedades comercializadas. **G.** Material de almacenamiento del café. **H.** Controles en las condiciones de almacenamiento. **I.** Tiempo de almacenamiento del café verde o pergamino antes de realizar el proceso de tostado. **J.** Tipos de curvas de tostado. **K.** Tiempos de desgasificación. **L.** Controles de calidad en el café



Fuente: elaboración propia. **Conversiones:** Anlf: Análisis físico; Anls: Análisis sensorial; AsdP: Asociación de productores; Blen: Blen; Brbn: Borbon; Cdaf: Cabecera de aire focalizada; Cerz: Cereza; Clmb: Colombia; Cstl: Castillo; Ctmr: Catimor; Ctrr: Caturra; Dias: Dias; DnSd: Densidad; Fndp: Finca de productores; Gesh: Geisha; Grdt: Grado de tostado; Grnp: Grainpro; Hmdd: Humedad; Hmdd: Humedad; Hora: Hora; Hors: Horas; Lons: Lonas; m: meses; Mnts: Minutos; Mojd: Mojado; Prgm: Pergamino; Prop: Propio; s: semana; Scdf: Sacos de fique; Timp: Tiempo; Típc: Típica; Tmpr: Temperatura; Trll: Trilladora; Undp: Unidades productivas; Verd: Verde; Vntl: Ventilación.

En cuanto a los procesos poscosecha se destaca que un 75% y 62% de los caficultores realizan procesos por la vía húmeda y seca respectivamente (Figura 11D). El beneficio por vía húmeda es el método tradicional para la obtención de café suave lavado en Colombia, consiste en la realización mínimo tres lavados después del proceso de fermentación. Es relevante que el café obtenido por medio de la vía seca tenga un alto porcentaje en el departamento, durante este proceso el café una vez recolectado

es lavado y seleccionado para posteriormente ser llevado al proceso de secado, generándose la fermentación en la pulpa y el mucilago del grano. Este tipo de café se caracteriza por tener menor acidez, y ser más dulce, sabroso, suave y complejo que el café procesado en húmedo.

El 56% de las empresas tostadoras de café compran principalmente café pergamino, y menos del 20% compra café verde y café mojado (Figura 10E). Durante los últimos años el comercio de pergamino se ha incrementado significativamente, debido a que se presentan menos riesgos en la calidad del grano en presencia de mohos, decoloraciones y proliferación de plagas, Puerta (2013a) indica que el pergamino y la película plateada son capas impermeables al agua que protegen la calidad del café almacenado. Por lo tanto, al almacenarse en condiciones óptimas de temperatura y humedad permite conservarse por más tiempo para ventas posteriores a diferencia del café verde y mojado (los cuales están más expuestos al deterioro).

El 66% de las empresas tostadoras compran principalmente la variedad Castillo y menos del 54% compran Caturra, Borbón, Geisha, Típica (Figura 10F). La variedad Castillo es una variedad desarrollada en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) a partir del cruzamiento entre la variedad Caturra y el Híbrido de Timor. Son variedades compuestas, de porte bajo, adaptadas a la zona cafetera colombiana, de alta producción, elevada resistencia a la roya y excelente calidad en taza (Cortina *et al.*, 2013).

El 71% de las empresas tostadoras de café realizan el almacenamiento en sacos de fique (Figura 10G, 11A) ubicados sobre estibas limpias, separado de las paredes y techos, en un sitio ventilado, seco, limpio y fresco (temperaturas moderadas). La gran mayoría de las empresas tostadoras realizan el almacenamiento del café en sacos de fique combinados con bolsas plásticas como las Grain pro (Figura 11B) ayudando a aislar el grano del ambiente garantizando que se mantenga una humedad entre el 10-12% y asegurando la frescura y calidad, retrasando el deterioro de los granos de especialidad, motivo por el cual estos tipos de empaques son los ideales para conservar el café por más tiempo durante su almacenamiento, en cuanto a las condiciones del mismo.

En las empresas tostadoras el 38% y el 34% controlan la humedad y la temperatura en el almacenamiento (Figura 10H). Puerta (2013b) menciona que los granos de café son higroscópicos, es decir, su contenido de humedad varía de acuerdo con las condiciones de temperatura y de humedad relativa del aire circundante donde se encuentran; en consecuencia, puede perder humedad (desorción) o ganar humedad (adsorber) durante su almacenamiento, causando problemas (formación de hongos, deterioro del café, desarrollo de sabores amargos, a madera y a moho en la bebida, coloración desuniforme, y pérdida de peso durante el tostado), por lo anterior es de gran importancia tener un control en el almacenamiento del café, ya que estos

Figura 11. Almacenamiento del café. **A.** Almacenamiento en sacos de fique. **B.** Costal de fibra y bolsas Grain Pro. **C.** Almacenamiento en sacos de fique y costales de fibra.



Fuente: elaboración propia. **Foto:** Malena Cortes (2023).

factores son determinantes en la calidad del grano, considerando un contenido de humedad del 10%-12%, una temperatura de 8 al 15°C, y una humedad relativa entre el 65% y 70%, pudiéndose almacenar el café hasta por 10 meses.

El 38% de las empresas tostadoras realizan el almacenamiento del café verde y pergamino durante un periodo de 1 a 2 semanas (Figura 10I). En el café los carbohidratos conforman un 60% de su composición y por esto los hongos son los principales microorganismos encontrados en los granos de café almacenados (Puerta, 2013b). Por lo anterior, con la finalidad de evitar riesgos el almacenamiento del café se lleva a cabo en este periodo de tiempo, teniendo en cuenta que por su calidad el aumento de volumen de las ventas ha mejorado constantemente lo que favorece el despacho del café almacenado, se debe tener en cuenta que el café es extremadamente poroso y absorbe fácilmente los sabores y aromas, por lo que se deben realizar ciertos parámetros adecuados anteriormente mencionados (Figura 10H) como también controlar los periodos de tiempo, con el fin de no perder sus sabores, aromas y potencializar el perfil sensorial, lo que hace que el café se venda más rápido (generando mayores ventas e ingresos).

Por otro lado, en las curvas de tostado de café el 88% se llevan a cabo mediante grados de tostados (claro, medio, medio oscuro, oscuro) estas condiciones y rangos de tostación se deben a los diversos clientes de las tostadoras (según el uso, tipo de preparación y gustos del consumidor) (Figura 10J). Mediante el grado de tostado la intensidad de las propiedades organolépticas del café varía (a mayor grado de tostado, se intensifican el amargor y el cuerpo, disminuyendo la acidez de la bebida), junto con el grado de tostado, las empresas tostadoras llevan a cabo en las curvas por medio de tiempo (horas) y temperatura en un 84%, presentando diversas características en relación con el color, aspecto, volumen, densidad, peso y cambios de composición química que producen diferentes sabores y aromas. En la torrefacción se desarrollan diversas reacciones entre los componentes del grano de café almendra mediante la acción del calor. Entre estos cambios se destacan la desecación, la caramelización de la sacarosa, la degradación de aminoácidos, la reacción de Maillard, la despolimerización de carbohidratos, las oxidaciones de los lípidos y ácidos clorogénicos, la formación de ácidos, el cambio de coloración del grano de verde a marrón y la producción de compuestos volátiles y melanoidinas (Puerta, 2013a).

En las empresas tostadoras de café el 84% de los tostadores llevan a cabo estos procesos por medio de tiempo y temperatura, en los cuales se tiene un control, por lo que en tostaciones en grados altos se producen bebidas quemadas, con amargos y cuerpos muy fuertes y desagradables, mientras que cuando no se tuesta el tiempo necesario, las bebidas de café resultan insípidas y aguadas, y el color del grano tostado es canela o marrón muy claro. Seguidamente el 94% de las tostadoras desgasifican el café por medio de minutos (Figura 10K, 12) con el fin de que el café recién tostado libere la cantidad de gas carbónico que se encuentra en el interior de los granos. Riaño & Jaramillo (2000) mencionan que si no se realiza la desgasificación correctamente se corre el riesgo de romper el empaque por las presiones que se generan, las cuales ocurre en los primeros días por lo que se recomienda el uso de válvulas desgasificadoras evitando que se pierdan los aromas propios del café, e identificando un buen café ante el consumidor.

Finalmente se realizan diversos controles de calidad entre estos los análisis físicos y sensorial realizado por el 66% y el 59% de las empresas tostadoras (Figura 10L), de acuerdo con Puerta (2015) estos controles de calidad son muy importantes en el proceso de tostación ya que describen las principales características de la calidad del café, permitiendo observar los granos negros, vinagres, flojos, aplastados, granos excelsos, se permite verificar la humedad, el aspecto, color, olor y defectos del grano con los que se seleccionan y mejoran las prácticas obteniendo un mayor porcentaje de almendra sana (control de calidad), igualmente se mide la calidad del café evaluando el aroma, la acidez, el amargor, el cuerpo, el dulzor, el sabor los cuales determinan si el producto es aceptado o rechazado, prediciendo la aceptabilidad del consumidor, con esto se le brinda a la tostadora la oportunidad de realizar mejoras, aplicar otras

Figura 12. Desgasificadores de café



Fuente: elaboración propia. **Foto:** Malena Cortes (2023).

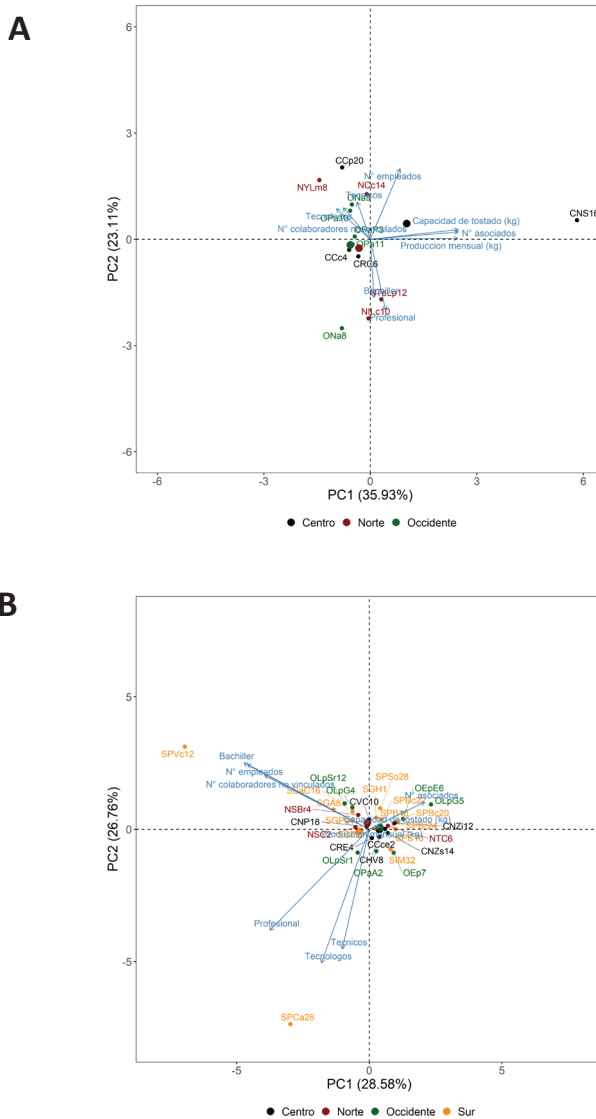
medidas con las que se permitirá identificar, y describir mejor las características del café en relación a su calidad obteniendo beneficios económicos, ya que el precio obtenido en la comercialización depende de la calidad del café.

Clasificación y tipificación de las empresas tostadoras de café y cacao

El análisis exploratorio de componentes principales evidenció que las empresas se asocian a las variables de producción y tamaño independientemente de la región (norte, centro, occidente y sur) (Figura 13). Para el cacao se observó que solamente una empresa ubicada en la región centro esta mayormente asociada con una alta producción mensual, número de asociados y capacidad de tostado (Figura 13A). Esto se corrobora a partir del clúster jerárquico realizado con la información obtenido de los componentes del PCA donde se evidencio que las empresas de cacao se agrupan en tres tipos de clúster que se pueden considerar como empresas grandes, medianas y pequeñas (Figura 14A). Las empresas medianas se asociaron con mayor número de empleados con nivel de estudio bachiller y profesional (Figura 13A). Las empresas pequeñas, aunque se asociaron a un mayor número de empleados, también están asociadas a empleados con un nivel técnico y tecnológico, pero no vinculados (empleados temporales).

En cuanto a las empresas tostadoras de café se observó que existe una subdivisión de las empresas grandes en 4 categorías (figura 13B). La primera categoría presentó una relación con un mayor número de empleados técnicos, tecnólogos y profesionales. La segunda evidenció una asociación positiva con la variable de trabajadores bachilleres, pero también con empleados no vinculados (es decir temporales). Las otras dos categorías que se pueden considerar empresas medianas-grandes se relacionaron con un mayor número de empleados asociados y la capacidad de tostado. Aunque el clúster evidencio dos clasificaciones más, las cuales se consideraron empresas medianas y pequeñas (figura 13B), todas estas en el análisis de componentes principales presentan una agrupación en la parte central asociadas a las demás variables (figura 13B).

Figura 13. Análisis de componentes principales **A.** Empresas tostadoras de cacao en Huila, Colombia. **B.** Empresas tostadoras de café en Huila, Colombia.



Tipificación de las empresas tostadoras de cacao

Grupo 1 - CNS16 (Figura 14): la empresa se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica de tipo sociedad anónima (S.A), estructurada en su componente teleológico en función de misión y visión, en relación al marketing cuenta con el uso de correo electrónico, página web/blog, Facebook, Instagram por donde promueven sus productos facilitando la interacción con los clientes, su posicionamiento, comercialización y las ventas, siendo los medios por los cuales se realizan estrategias

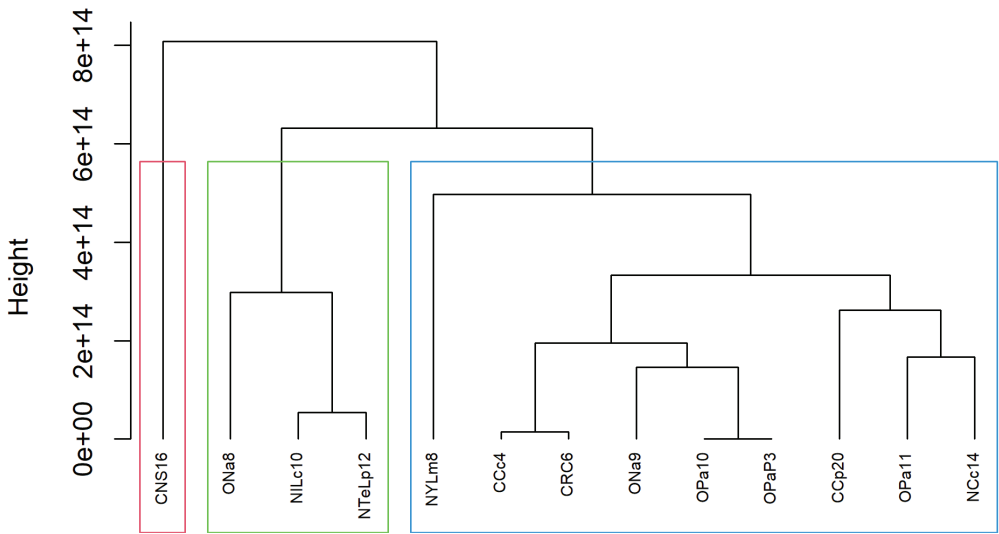
de ventas, condiciones de precio y ventajas del producto, cuenta con una estructura organizacional definida en funciones y cargos, con 50 colaboradores vinculados con niveles de estudio de bachiller, tecnólogos y profesionales.

La empresa obtiene la materia prima (grano seco) por medio de asociaciones de productores, por lo que desconocen el proceso de fermentación y secado de los granos a los cuales son sometidos, encargándose de realizar el almacenamiento en sacos de fique, en un tiempo máximo de 7 días, con el fin de prevenir la aparición de mohos presentes en los granos secos. Mensualmente compran 40 toneladas de cacao, las cuales son tostados en una tostadora nacional de 240 kg manejando diferentes curvas, teniendo como indicador final los tiempos (40 minutos), el olor, grado de tostado (160°C), sonido y craqueo.

En relación a los aspectos legales la empresa cuenta con registro mercantil, etiquetado, RUT, empaque, registro INVIMA, código de barras, marca registrada, certificación de buenas prácticas agrícolas BPA, y Certificación ISO 9001, Sistema de Gestión de Calidad – ICONTEC, la estrategia de venta de la empresa cuenta con un tipo de mercado punto de venta, tienda a tienda, grandes superficies, y hasta el momento están en proceso de exportar a futuro.

Grupo 2 - ONa8, NILc10, NTeLp12 (Figura 14): el grupo se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica y natural, de tipo de sociedad por acciones simplificadas y empresas asociativas de trabajo E.A.T, las cuales cuentan con correo electrónico, Facebook, Instagram y muy pocas con página web/blog, siendo el medio por el cual

Figura 14. Tipificación por tamaño de empresas tostadoras de cacao en Huila, Colombia



realizan diversas estrategias de ventas como ventajas del producto, condiciones del precio, distribución del producto, promociones y publicidad.

En estas empresas muy pocas cuentan con una estructura organizacional en funciones y cargos del gerente, contador, auxiliar administrativo, los operarios, y vendedores; los cuales mencionados anteriormente, solo 3 están vinculados oficialmente en la empresa, teniendo estos un nivel educativo técnico, profesional, y cursos en manipulación de alimentos.

Es importante resaltar que la empresa conoce la procedencia de la materia prima la cual es adquirida mayormente en grano seco, y los datos de la finca en general como altitud, extensión por ha, ubicación ya que la adquieren de diferentes municipios del departamento de fincas de productores, como también en su gran mayoría la obtienen de sus fincas propias. Mensualmente tienen una proyección de compra de máximo 700 kg, eligiendo preferiblemente en la compra la variedad criollo, la cual es sometida al proceso de fermentación en baldes y cajones de madera tipo cedro blanco, realizándoles diversos controles y tratamientos de limpieza, lavando los baldes con solo agua y cepillo para retirar la suciedad, el cajón de madera se limpia con un trapo en seco, luego raspan el cajón para quitar el mucilago, y así poder ser usados cada 15 días, durante 5 a 7 días que es el tiempo de fermentación, para luego proceder al secado siendo este realizado por los productores al sol en marquesinas y paseras.

La empresa realiza el almacenamiento de la materia prima en sacos de fique y costales de fibra, durando hasta máximo un mes ya que es uno de los procesos en los cuales han observado mohos como también en la fermentación y secado (por eso se evita un largo tiempo de almacenamiento). Para el proceso de tostado de los granos lo realizan en hornos y tostadoras con una capacidad de máximo 90 kg, realizando diferentes temperaturas de tostado en un tiempo de 28 min, siendo este un indicador para finalizar el proceso junto con los grados de tostado (120°C) y el sonido craqueo.

En relación a los aspectos legales la empresa cuenta con registro mercantil, etiquetado, RUT, empaque, registro INVIMA, código de barras (algunas empresas cuentan con este requisito y otras se encuentran en proceso de implementación), marca registrada, certificación de buenas prácticas agrícolas BPA, y Certificación ISO 9001, Sistema de Gestión de Calidad – ICONTEC, estas producciones cuentan con un tipo de mercado punto de venta, HORECA, tienda a tienda, grandes superficies, maquilan, y algunas ya realizan exportaciones.

Grupo 3 - NYLm8, CCc4, CRC6, ONa9, OPa10, OPaP3, CCp20, OPa11, NCc14 (Figura 14): el grupo se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica y natural, siendo estos emprendimientos, empresas de tipo de sociedad sin ánimo de lucro, y sociedad por

acciones simplificada, las empresas en relación a su área de marketing cuentan con el uso de correo electrónico, Facebook, Instagram para promover los productos a través de estas redes sociales, manejando estrategias como las condiciones de precio, las formas de distribución, promociones, publicidad.

Tan solo 2 empresas cuentan con una estructura organizacional en (funciones y cargos) como presidente, vicepresidente, tesorero, secretario, vocal, fiscal, de los cuales solo 1 está vinculado directamente con la empresa, resaltando que los colaboradores que realizan las labores tienen niveles de estudio tanto bachiller, técnicos, tecnólogos y profesionales.

En relación a la materia prima estos la obtienen por medio propio o compras a finca de productores y asociaciones de productores, seleccionando el cacao en mazorca, grano en baba y grano seco de las variedades híbrido, criollo, y trinitario, teniendo una compra mensual de máximo 800 kg de cacao, para estas compras los colaboradores están informados de todos los procedimientos que se le realizan a la materia prima como el proceso de fermentación en cajones de madera tipo igua, costales, baldes y canoas, los cuales son usados durante 5-6 días, con una frecuencia de 15 días mientras dura el proceso de fermentación, los procesos de limpieza (antes y después del proceso, se limpia y lava solo con agua).

Para el proceso de secado, los productores lo realizan al sol, en marquesinas y en paseras de madera cubierta en plástico, el respectivo almacenamiento de los granos de cacao lo realizan en sacos de fique con un tiempo inferior a 4 semanas con el fin de evitar presencia de mohos, los cuales también se originan en la mazorca, el secado, y la fermentación.

Los granos de cacao en este grupo de empresas son tostados de forma artesanal, al horno y en tostadoras, manejando un volumen de mínimo 4 kg y máximo de 38 kg con diferentes temperaturas de tostado (de ingreso y salida), con un indicador de olor, tiempos, el grado de tostado, sonido/craqueo para finalización del proceso.

En relación a los aspectos legales las empresas cuentan con registro mercantil, etiquetado, RUT, empaque, registro Invima, marca registrada, el producto se comercializa por medio de un tipo de mercado punto de venta, tienda a tienda, grandes superficies, y maquila.

Tipificación de las empresas tostadoras de café

En el análisis de clúster se identificaron 7 tipologías de agrupación (Figura 15), a continuación, se realizó una descripción de cada una de ellas:

Grupo 1 - SPCa26 (Figura 15): El grupo se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica creada desde el 2014. Corresponde a una sociedad por acciones simplificada

(S.A.S). No tiene estructurado su componente teleológico ni cuenta con una estructura organizacional en funciones y cargos, ni personal contratado de base, tampoco tiene un plan de mercadeo estructurado.

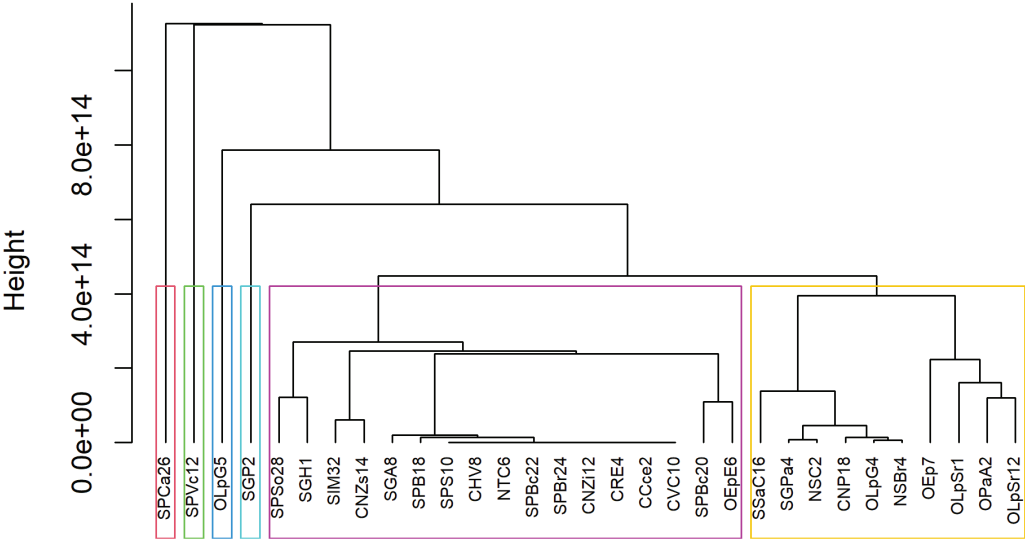
El personal es capacitado en curvas de tostión (temperatura y equilibrio). En relación con la materia prima se obtiene por medio de compras directas a finca de productores en almendra, trillado y café pergamino, de las variedades castillo, Borbón y Blend, los cuales son almacenados en sacos de fique.

La empresa produce al mes 400 kg de café tostado, de los cuales el 90% corresponde a servicio a terceros. Para el proceso de tostado en las empresas se manejan diferentes curvas, enfocadas al grado de tostado, luego del tostado se realiza la desgasificación durante varias horas, realizándole controles de humedad y análisis físicos y sensoriales.

En relación con los aspectos legales la empresa cuenta con el registro mercantil, RUT, registro INVIMA, etiqueta, empaque, código de barras, la marca registrada se encuentra en proceso de registro. En relación a la comercialización, los productos son vendidos por el tipo de mercado vitrina.

Grupo 2 - SPVc12 (Figura 15): el grupo se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica, creada desde el año 2017, de tipo de sociedad por acciones simplificada S.A.S, hasta el momento la empresa solo cuenta con el uso de correo electrónicos para llevar a cabo temas empresariales, cuenta con 2 personas contratadas de base, quienes están capacitados en curvas de tostión (realizadas cada año).

Figura 15. Tipificación por tamaño de empresas tostadoras de café en Huila,



En relación con la materia prima compran preferiblemente el café pergamino; este lo obtienen de producción propia y por medio de compras a fincas de productoras (las cuales cuentan con una extensión de 0 a 5 ha, y una altitud de los 1.501 a 1.750 m.s.n.m.). Mensualmente la empresa produce entre 1.500 y 2.000 kg de café tostado, ofreciendo el 100% de la producción a servicios de terceros, para el proceso de tostión la empresa cuenta con una tostadora de 25 kg, el tostado se lleva a cabo mediante diferentes curvas de tostión, por medio de tiempo (15-18 minutos), temperaturas (temperatura de ingreso 180°C – temperatura de salida 197°C), cabecera de aire focalizadas, grado de tostado, con un tiempo de desgasificación por horas, realizándoles controles de calidad físico. En relación a los aspectos legales de la empresa esta cuenta con el registro mercantil, RUT, registro INVIMA, certificación en manipulación de alimentos, y un tipo de mercado punto de venta y maquila.

Grupo 3 - OLpG5 (Figura 15): El grupo se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica, creada desde el año 2014, de tipo de propiedad industrial sin ánimo de lucro, hasta el momento la empresa solo cuenta con el uso de correos electrónicos y páginas web para llevar a cabo temas empresariales, cuenta con 8 personas contratadas de base, con nivel de estudio bachiller, tecnólogos y profesionales, quienes están capacitados en curvas de tostión y realizan pruebas de catación según el formato SCAA.

En relación a la materia prima la obtienen en café verde de la variedad castillo y caturra por medio de fincas de productores y asociaciones de productores, siendo estas almacenadas en bolsas durante 1 a 2 semanas máximo, controlando su respectiva humedad. Para el proceso de tostión producen al mes hasta 48 kg de café tostado, siendo de este el 5% de la producción destinada a terceros. El tostado se lleva a cabo mediante diferentes curvas de tostión, por medio de tiempo (8 minutos), grado de tostado (temperatura de ingreso 100°C - temperatura de salida 150°C), y un tiempo de desgasificación de 15 minutos, a los cuales se les realiza controles de humedad, análisis de defectos y sensorial.

En relación con los aspectos legales de la empresa cuenta con sistema general de seguridad social en salud (SGSS), el registro mercantil y RUT, teniendo un tipo de mercado punto de venta-vitrina.

Grupo 4 - SGP2 (Figura 15): El grupo se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica, creada desde el 2013, hasta el momento la empresa, solo cuenta con el uso de correo electrónico para llevar a cabo temas empresariales, cuenta con 1 persona contratada de base, con nivel de estudio profesional, el cual está capacitado en curvas de tostión, barismo, y pruebas de catación.

En relación con la materia prima, adquiere el café lavado, por fincas propias y por compras a fincas de productores de diferentes municipios, cultivado a una altitud entre los 1.251 y 1.750 m.s.n.m, en fincas con una extensión por ha de 0 a 5 ha, o están en un rango de 6 ha hasta las 20 ha.

El almacenamiento del café lo realizan en sacos de fique, lonas y bolsas durante 1 a 2 semanas, controlando su respectiva humedad, temperatura, para el proceso de tostión, cuentan con una tostadora de 25 kg, con la cual producen al mes hasta 19.000 kg de café tostado, siendo de este el 1% de la producción a terceros, el tostado se lleva a cabo mediante diferentes curvas de tostión, por medio de tiempo (14 minutos), grado de tostado y temperatura (ingreso 25°C - salida 200°C), y un tiempo de desgasificación por días.

En relación a los aspectos legales de la empresa solo cuenta con el registro mercantil, RUT, registro INVIMA, marca registrada y certificación de buenas prácticas agrícolas. Las buenas prácticas de manufactura se encuentran en proceso, contando con un tipo de mercado de maquila.

Grupo 5 - SPSO28, SGH1, SIM32, CNZs14, SGA8, SPB18, SPS10, CHV8, NTC6, SPBc22, SPBr24, CNZi12, CRE4, CCce2, CVC10, SPBc20, OEpE6 (Figura 15): el grupo se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica y natural creadas desde el año 1979, siendo un grupo de empresas de sociedad por acciones simplificada S.A.S, sociedad de responsabilidad limitada LTDA. y entidades sin ánimo de lucro ESAL, en la actualidad estas empresas tienen muy fortalecido el uso de tecnologías digitales y las redes sociales, cuentan con el uso de correos electrónicos, páginas web/blog, Facebook, Instagram, teniendo estructuradas estrategias de mercadeo como las condiciones de precio, producto, plaza, distribución, promociones y publicidad.

En relación a los integrantes de las empresas algunas tostadoras tiene 1 persona contratada de base; otras, tres personas contratadas de base (presidente, secretaria, tostador y vendedor); y cuatro personas (representante legal, secretaria, tostador y catador-análisis físico); y cinco personas (junta directiva, representante legal, secretaria general, área administrativa y área operativa). Estos cuentan con niveles de estudio bachiller, técnico, tecnólogo y profesional, como también los tostadores están capacitado en curvas de tostión, barismo, y pruebas de catación, certificados en Q Grader, estas capacitaciones las llevan a cabo cada 3 meses por medio del Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Procolombia y entidades independientes.

En relación a la materia prima las empresas tostadoras compran preferiblemente el café verde, cereza, café mojado, café pergamino de las variedades Castillo, Caturra, Borbón, Geisha, Catimor, Tabí, y Colombia, en fincas propias, o por medio de compras de fincas de productores, asociaciones de productores, las cuales están ubicadas en distintos municipios del departamento a una altitud entre los 1.250 m.s.n.m. hasta los 2.000 m.s.n.m.

El personal de las empresas conocen todo su proceso de poscosecha, realizan su almacenamiento en sacos de fique, lonas y bolsas Grain Pro almacenado mínimo de 1 a 2 semanas y máximo de 2 meses, controlando su respectiva humedad, temperatura, y ventilación.

Las empresas cuentan con tostadoras de 10 kg a 25 kg, con la cual producen al mes hasta 19.000 kg de café tostado, siendo de este el 1% de la producción a terceros, el tostado se lleva a cabo mediante diferentes curvas de tuestión en tiempos, temperaturas, cabeceras de aire focalizadas, y grado de tostado, por medio de tiempo (10 a 15 minutos), grado de tostado y temperatura (ingreso 180°C - salida 210°C), y un tiempo de desgasificación por minutos y horas a las que se les realiza análisis físico, análisis sensorial, catación por medio del formato SCAA, humedad, tamizaje en trilladora, y selección de defectos por malla.

En relación con los aspectos legales de las empresas cuentan con el registro mercantil, RUT, registro INVIMA, marca registrada, certificación a las Buenas Prácticas Agrícolas, Buenas Prácticas de Manufactura, sello de origen o denominación de origen (DOP) e Indicaciones Geográficas Protegidas (IGP), Café de Colombia - Federación Nacional de Cafeteros, Sellos de calidad CO, 4C, Rain Forest y Fairtrade, sus productos cuentan con etiqueta, empaque, código de barras (algunos en proceso), marca registrada, con aseguramiento en Sistema General de Seguridad Social en Salud (SGSS), en las cuales se maneja un tipo de mercado tienda a tienda, HORECA, vitrina punto de venta, maquila, grandes superficies, y exportaciones.

Grupo 6 - SSaC16, SGPa4, NSC2, CNP18, OLpG4, NSBr4 (Figura 15): el grupo se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica y natural creada desde el 2015 de tipo de Sociedad Anónima Simplificada (S.A.S.), son también entidades sin ánimo de lucro (ESAL), hasta el momento las empresas cuentan con el uso de Facebook, Instagram, correo electrónico, y solo una con página web, llevan a cabo el marketing de los productos por medio de promociones, publicidad.

Hasta el momento las empresas no cuentan con personal contratado de base, pero sus colaboradores tienen un nivel de estudio técnico, tecnólogo y profesional, los cuales la mayoría están capacitados anualmente en curvas de tuestión por medio del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), como también pruebas de catación por medio el formato SCAA.

Estas empresas tostadoras adquieren la materia prima en café pergamino, café verde, de la variedad Típica, Castillo, Caturra, Borbón, Colombia, Geisha y Tabí por medio de fincas productoras propias, fincas de productores y asociaciones de diferentes municipios, las cuales están a una altitud de las 0,5 ha hasta más de 20 ha.

Estos productores realizan a la materia prima los procesos de lavado, semiseco, seco, fermentación y secado, en relación almacenamiento, se lleva a cabo de 1 a 2 semanas y hasta por más de 2 meses en bolsas GrainPro, sacos de fique controlando su respectiva humedad, temperatura, luminosidad.

Para el proceso de tuestión se produce al mes hasta 3.000 kg de café tostado, de los cuales en la mayoría de los casos, el 50% de la producción es servicio a terceros,

las empresas cuentan con tostadoras nacionales el tostado se lleva a cabo mediante diferentes curvas de tostado, grado de tostado y temperatura (ingreso 180°C - salida 200°C), en un tiempo de 10-15 minutos, cabeceras de aire focalizadas y un tiempo de desgasificación por minutos e incluso días.

También se le realiza análisis microbiológico, análisis físico, sensorial, controles de Humedad, catación de acuerdo al formato SCAA y perfil de taza.

En relación con los aspectos legales de la empresa solo cuenta con el registro mercantil, RUT, registro INVIMA, marca registrada, Rainforest practices, certificadas en buenas prácticas agropecuarias, se encuentran en proceso para certificarse en buenas prácticas de manufactura, Sistema de Seguridad Social en Salud (SGSS), sus productos cuentan con empaque, etiqueta, código de barras, marca registrada, en relación a las ventas estas se llevan a cabo mediante un mercado tienda a tienda, maquila, punto de venta y exportaciones.

Grupo 7 - OEp7, OLpSr1, OPaA2, OLpSr12 (Figura 15): el grupo se caracteriza por ser un tipo de empresa jurídica y natural, creada desde el año 2013, de tipo de sociedad anónima simplificada S.A.S y sociedad limitada LTDA., las cuales tienen estructurado su componente teleológico (misión, visión, objetivos, valores), pero tienen un poco uso de las redes sociales como Facebook, e Instagram, además de no contar con un plan de mercadeo para sus productos. Algunas de las empresas tienen personal pero no está contratado de base, a diferencia de una que si cuenta con 4 personas contratadas de base, de las cuales el gerente, tesorero, operario de maquinaria y fiel de compra hacen parte de su estructura organizacional, con nivel de estudio de bachiller, técnico, profesional, y capacitados en curvas de tostión, evaluación técnica de la calidad del café y cursos de catación, evaluación, calidad físico del café, realizadas por medio del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y personas externas cada año.

En relación a la materia prima, las empresas la adquieren en seco, y café lavado de las variedades Castillo, Caturra, Borbón, Colombia, Catimor, provenientes de fincas de productores y asociaciones de productores, ubicadas en diferentes municipios a una altitud de 1.501 a 2.000 m.s.n.m., con una extensión de 0 a 5 ha y hasta más de 20 ha. La materia prima es almacenada en sacos de fique y costales de fibra entre 1 a 4 semanas de almacenamiento, llevando controles de humedad y temperatura.

En el proceso de tostado se cuenta con una tostadora de 12 kg, 16 kg y 50 kg, y se manejan diferentes curvas de tostado en temperaturas (ingreso 180 °C - salida 210 °C), tiempo de 15 a 20 minutos, cabeceras de aire focalizadas, grado de tostado, y tiempos de desgasificación por minutos y horas, a la que se le realiza controles de calidad como el análisis microbiológico, análisis sensorial, revisión de empaque, fecha, lote, almacenamiento, humedad, análisis de defectos, y pruebas de catación de acuerdo al formato SCAA.

En relación a los aspectos legales de la empresa cuenta con el registro mercantil, RUT, registro INVIMA, marca registrada, certificación en buenas prácticas de manufactura, manipulación de alimentos, sistema general de seguridad y salud en el trabajo (SG-SST), Rainforest Practices. El producto cuenta con empaque, etiqueta, código de barras, marca registrada, contando con un tipo de mercado de maquila, punto de venta y tan solo una empresa realiza exportaciones.

Consideraciones finales

Las empresas tostadoras de café difieren significativamente a las empresas tostadoras de cacao, presentando una mejor conformidad a diferencia de las cacaoteras, dedicadas a la actividad artesanal, siendo menos constituidas, organizadas y menos estables.

Las empresas tostadoras de café y cacao no cuentan con la trazabilidad en los procesos de adquisición de la materia prima y algunos procesos de poscosecha como el despulpado, la fermentación, el secado y el almacenamiento que pueden afectar la calidad de los productos.

Los emprendimientos de cacao requieren de más apoyo por parte de entidades públicas y privadas, y el desarrollo de proyectos encaminados al mejoramiento con los procesos relacionados al procesamiento del grano (fermentación, secado, tostado) para la transformación en diversos productos.

Por lo anterior, por medio de esta caracterización se logró obtener información en cuanto a los requerimientos de los procesos en las cuatro categorías aplicadas, y a la identificación de aquellos actores importantes que participen e involucren más en los procesos, buscando una mejora y fortalecimiento de forma efectiva con la finalidad de lograr sus propósitos, mayor fortalecimiento, calidad en los productos, certificaciones en calidad, denominación de origen para el caso del cacao (teniendo en cuenta que el Huila obtuvo denominación de origen de café especial en el año 2013) y, sobre todo, que al transformar y comercializar se obtenga un valor agregado.

Referencias

- Alvarado, M.C., Sánchez, P. D. C., & Polongasa, S. G. N. (2023). Emerging rapid and non-destructive techniques for quality and safety evaluation of cacao: recent advances, challenges, and future trends. *Food Production, Processing and Nutrition*, 5(1), 40. <https://doi.org/10.1186/s43014-023-00157-w>.
- Álvarez-Fernández, C.O., Liconte-Salgado, N.D., Pérez-Silva, E.E., Lares-Amaíz, M. del C., & Perozo-González, J.G. (2022). Revisión sobre los atributos físicos, químicos y sensoriales como indicadores de la calidad comercial del cacao. *Petroglifos. Revista Crítica transdisciplinar*, 5(1), 12-25. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6548316>.
- Bastos, V.S., Uekane, T.M., Bello, N.A., de Rezende, C.M., Flosi Paschoalin, V.M., & del Aguila, E.M. (2019). Dynamics of volatile compounds in TSH 565 cocoa clone fermentation and their role on chocolate flavor in Southeast Brazil. *Journal of Food Science and Technology*, 56(6), 2874-2887. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03736-3>.
- Becerra, L.D., Quintanilla-Carvajal, M.X., Escobar, S., & Ruiz-Pardo, R.Y. (2024). From controlled transformed cocoa beans to chocolate: Bioactive properties, metabolomic profile, and in vitro bioaccessibility. *Food Chemistry* 433, 137321. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137321>.
- Bernal-Jiménez, M.C., & Rodríguez-Ibarra, D.L. (2019). Lastecnologías de la información y comunicación como factor de innovación y competitividad empresarial. *Scientia et Technica*, 24(1), 85-95. <https://doi.org/10.22517/23447214.20401>.
- Cadby, J., Araki, T., & Villacis, A. H. (2021). Breaking the mold: Craft chocolate makers prioritize quality, ethical and direct sourcing, and environmental welfare. *Journal of Agriculture and Food Research*, 4, 100122. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2021.100122>.
- Castellanos, Ó.F., Torres, L. M., Fonseca, S. L., Montañez, V. M., & Sánchez, A. (2007). *Agenda Prospectiva de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Cadena Productiva de Cacao-Chocolate en Colombia*. Giro Editores Ltda. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69981>.
- Cerón, I. X., García, M. C., Rodríguez, E., Cubillos, A., Polanco, E., López, M., Moreno, J., Parra, E., & Quiñones, F. (2020). *Estrategias tecnológicas para el manejo del cultivo y el beneficio del cacao*. AGROSAVIA, FEDECACAO. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.institutional.7403572>.
- Chaves, L. G. (2009). El café tostado y molido: caracterización de la industria torrefactora nacional. *Umbral Científico*, 14, 98-106.
- Cortina, H. A., Moncada, M., & Herrera, J.C. (2013). *Variedad Castillo: Preguntas frecuentes*. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé). <http://hdl.handle.net/10778/410>.
- Cortés-Gutiérrez, H.M. (2023). Caracterización de las Empresas Tostadoras de Café y Cacao en el Departamento del Huila. [Trabajo de grado de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/58002>.

- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2023). *Economía Nacional*. <https://www.fedecacao.com.co/economianacional>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2024). *Estadísticas cafeteras*. <https://federaciondecafeteros.org/wp/estadisticas-cafeteras/>
- Ferrer, J. V. (2019). Neuromarketing kinestésico: efectos del chocolate en el comportamiento del consumidor [Trabajo de grado de maestría, Universidad Politécnica de Cartagena]. <http://hdl.handle.net/10317/8132>
- Gobernación del Huila. (2022). En el Huila inicia el censo cacaotero 2022. <https://www.huila.gov.co/publicaciones/12426/en-el-huila-inicia-el-censo-cacaotero-2022/>.
- Gómez, B., Díaz, M.T., Valdés, R.C., & Miguel, M.A. (2021). Efectos del consumo de café sobre la salud. *Medisur*, 19(3), 492-502. <http://www.medisur.sld.cu/index.php/medisur/article/view/4951>
- González-Orjuela, S. (2021). Revisión de métodos para la fermentación de cacao y análisis de la fermentación combinada de cacao criollo y forastero [Trabajo de grado de pregrado, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano]. <http://hdl.handle.net/20.500.12010/22265>
- Guerra, L. (2015). Memoria organizacional y competencias colectivas en el marco de las organizaciones inteligentes en las torrefactoras de café venezolanas. *Scientia Unellez*, 7(1), 77-80.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2014). Informe técnico final. Proyecto de innovación: Difusión de micro túneles desmontables de secado y súper bolsa Grain pro como tecnologías post cosecha en banco de semillas. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/19023>.
- López, D., & González, J. H. (2012). TIC, redes sociales y la cadena de valor para la comercialización del café. *Scientia et Technica*, 17(51), 138-144. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84923910021>.
- Morales-Intriago, F., Carrillo-Zenteno, M., Ferreira-Neto, J., Peña-Galeas, M., Briones-Cacedo, W., & Albán-Moyano, M. (2018). Cadena de comercialización del cacao nacional en la provincia de Los Ríos, Ecuador. *Ciencia y Tecnología*, 11(1), 63-69. <https://doi.org/10.18779/cyt.v11i1.222>
- Mordor Intelligence. (2023). *Análisis del tamaño y la participación del mercado de chocolate tendencias y pronósticos de crecimiento (2023-2028)*. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/chocolate-market>
- Puerta, G.I. (2013a). Calidad del café. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, *Manual del cafetero colombiano: Investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura*, 3, 81-110. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4346>.
- Puerta, G. I. (2013b). La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. *Centro Nacional de Investigaciones de Café* (Cenicafé), 1-8. <http://hdl.handle.net/10778/418>.
- Puerta, G. I. (2015). Buenas prácticas para la prevención de los defectos de la calidad del café: Fermento, reposado, fenólico y mohoso. *Centro Nacional de Investigaciones de Café* (Cenicafé). 1-12. <http://hdl.handle.net/10778/675>.

- Quintana-Fuentes, L. F., García-Jerez, A., & Moreno-Martínez, E. (2018). Perfil sensorial de cuatro modelos de siembra de cacao en Colombia. *Entramado*, 14(2), 256-268. <http://dx.doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.2.4756>
- Riaño, C. E., & Jaramillo, B. (2000). Uso de válvulas desgasificadoras para el empaque y almacenamiento de café tostado. *Cenicafé*, 51(1), 66-67. <http://hdl.handle.net/10778/969>.
- Ríos-Jara, J., & Lévano-Rodríguez, D. (2022). Importancia de los dispositivos usados en la fermentación de Cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 2(1), e281. <https://doi.org/10.51252/raa.v2i1.281>.
- Sandoval, A. M. (2020). Cambios fisicoquímicos durante el tostado artesanal del cacao: una contribución teórica para la transferencia social del conocimiento en la vereda de Alto Guapaya, Meta. [Trabajo de grado de pregrado, Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/52089>
- Sari, A. B. T., Gola, S., Rothkopf, I., Schweiggert-Weisz, U., & Schieber, A. (2026). Improving the sensory properties of unfermented cocoa press cake via hydration, yeast, and bromelain treatments. *Applied Food Research*, 6(1), 101606. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101606>
- Velásquez-Martínez, S. Y., & Cuestas-González, L. N. (2018). Estrategias de internacionalización en el sector cafetero colombiano; caso Café Castillo de Santa Rosa [Trabajo de grado de pregrado, Universidad de La Salle]. <https://hdl.handle.net/20.500.14625/30603>.
- Vesga, J. C., Contreras, M. F., & Vesga, J. A. (2022). Uso del modelo de Holt-Winters como estrategia para la predicción de condiciones ambientales durante el proceso de almacenamiento del cacao. *Revista EIA*, 19(38), 3820. <https://doi.org/10.24050/reia.v19i38.1593>.
- Vidal-Tovar, C.R., García-Moreno, A.M., Severiche-Sierra, C.A., Ruiz-Cabezas, M.R., Martelo-Gómez, R.M., Ahumado-Monterrosa, M.J., & Martínez-Zabaleta, M.E. (2019). Model of sustainable rural associative enterprise: the case of coffee and cocoaproductioninthemunicipalityofValledupar(ColombianCaribbean). *Sylwan*, 163(12), 433-449 . <https://hdl.handle.net/20.500.12442/4470>

Capítulo 2

Caracterización de compuestos neoformados (NFCs) en café y cacao: formación, comparación y evaluación de riesgos

Characterization of Neoformed Compounds (NFCs) in Coffee and Cocoa: Formation, Comparison and Risk Assessment

Resumen

Los compuestos neoformados (NFCs) se generan durante el procesamiento térmico de alimentos como el café y el cacao mediante reacciones de Maillard, caramelización, oxidación lipídica y degradación de carbohidratos y proteínas. Estos compuestos presentan potencial genotóxico o carcinogénico, por lo que se requiere caracterizar su formación, ocurrencia y exposición dietaria. Este capítulo cuantifica y compara los NFCs en granos tostados de café y cacao del Huila (Colombia), evalúa el efecto de la preparación de la bebida y estima el riesgo para la población de Neiva mediante la Ingesta Diaria Estimada (EDI) y el Margen de Exposición (MOE). Los niveles de acrilamida fueron similares en ambas matrices; sin embargo, el cacao presentó mayores concentraciones de HMF, asociadas a su mayor contenido de azúcares, mientras que el café mostró valores superiores de FFA y 2-furfural. Durante la preparación de la bebida, la acrilamida disminuyó notablemente ($\approx 24\%$ de transferencia), mientras que HMF y FFA aumentaron, favorecidos por las condiciones ácidas y térmicas de extracción. Aunque la ingesta media se mantuvo dentro de rangos considerados seguros, el percentil 95 superó los valores de referencia para HMF y mostró $\text{MOE} < 10.000$

para acrilamida, lo que indica escenarios de mayor preocupación toxicológica. En conjunto, la exposición a NFCs depende de la matriz, de las condiciones de procesamiento y de los hábitos de consumo. Si bien el café aporta compuestos bioactivos seguros, los consumidores de alta ingesta pueden enfrentar riesgos, lo que subraya la necesidad de estrategias integrales de mitigación durante el tostado y la preparación.

Palabras clave: *Contaminantes de proceso, Cromatografía, Exposición dietaria, Seguridad alimentaria, Reacción de Maillard.*

Abstract

Neoformed compounds (NFCs) are generated during the thermal processing of foods such as coffee and cocoa through Maillard reactions, caramelization, lipid oxidation, and the thermal degradation of carbohydrates and proteins. Several of these compounds exhibit potential genotoxic or carcinogenic properties, necessitating characterization of their formation, occurrence, and dietary exposure. This chapter quantifies and compares NFCs in roasted coffee and cocoa beans from the Huila region (Colombia), evaluates the effects of beverage preparation, and estimates health risks to the population of Neiva using the Estimated Daily Intake (EDI) and Margin of Exposure (MOE) approaches. Acrylamide levels were comparable in both matrices; however, cocoa exhibited higher HMF concentrations, associated with its higher sugar content, whereas coffee showed higher levels of furfuryl alcohol (FFA) and 2-furfural. During beverage preparation, acrylamide decreased markedly ($\approx 24\%$ transfer), while HMF and FFA increased, favored by the acidic and thermal conditions of extraction. Although mean intake values remained within ranges considered safe, the 95th percentile exceeded reference values for HMF and yielded MOE values below 10,000 for acrylamide, indicating scenarios of increased toxicological concern. Overall, exposure to NFCs is matrix-dependent and strongly influenced by processing conditions and consumption habits. While coffee also provides beneficial bioactive compounds, high-consumption groups may face elevated risks, underscoring the need for integrated mitigation strategies during roasting and beverage preparation.

Keywords: *Process contaminants, Chromatography, Dietary exposure, Food safety, Maillard reaction.*

Introducción

Los compuestos neoformados (NFCs) en alimentos son sustancias químicas que no están presentes originalmente en los alimentos crudos, sino que se generan durante el procesamiento térmico cuando se superan temperaturas de 120°C.

Estas transformaciones ocurren principalmente por reacciones químicas inducidas por el calor, como la reacción de Maillard, la caramelización, la pirólisis de lípidos y la degradación térmica de proteínas y carbohidratos. Algunos NFCs pueden tener efectos beneficiosos, como el desarrollo de compuestos aromáticos y de sabor característicos en productos tostados. Sin embargo, otros pueden representar un riesgo para la salud, ya que algunos han sido asociados con efectos tóxicos, carcinogénicos o proinflamatorios.

Entre los NFCs de interés se encuentran la acrilamida (AA), el furano, el 5-hidroximetilfurfural (HMF) y el alcohol furfurílico (FFA). La presencia de estos compuestos en alimentos ha suscitado una creciente preocupación en la comunidad científica y la industria alimentaria debido a su potencial impacto en la salud humana. En particular, algunos de estos compuestos han sido clasificados como posibles o probables carcinógenos. La acrilamida (AA) es un compuesto de reconocida genotoxicidad, cuya clasificación como probable carcinógeno para humanos (Grupo 2A) ha sido establecida por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC). De manera similar, el furano ha sido clasificado como posible carcinógeno (Grupo 2B), evidenciando su potencial riesgo toxicológico. Por otro lado, aunque el HMF y el FFA no han sido formalmente categorizados por la IARC, diversas investigaciones han reportado que pueden exhibir actividad mutagénica, carcinogénica y citotóxica, sugiriendo un impacto adverso sobre la salud humana (Çelik & Gökmen, 2020). Se han realizado numerosos estudios para comprender mejor los mecanismos de formación de la AA, el furano, el HMF y el FFA en diversos productos alimenticios, así como para desarrollar estrategias de mitigación efectivas (Barrios *et al.*, 2021). Además de los efectos genotóxicos y carcinogénicos mencionados, estas sustancias también pueden tener otros impactos negativos en la salud humana, como daños en el sistema nervioso y problemas reproductivos. Por lo tanto, es crucial la monitorización de la presencia de estos compuestos en los alimentos, así como desarrollar técnicas de procesamiento y cocción que minimicen su formación. Estos compuestos están presentes en diversos alimentos, entre los cuales destacan el café y el cacao.

Su formación se encuentra estrechamente relacionada con la reacción de Maillard, un proceso termoquímico clave en el desarrollo de compuestos de sabor y color durante el tostado. En particular, la acrilamida (AA) se genera a partir de la degradación térmica de azúcares reductores y aminoácidos, siendo la asparagina su principal precursor en el café (Barrios-Rodríguez *et al.*, 2021). La caramelización de azúcares como las hexosas permite la formación

de HMF (Murkovic & Bornik, 2007), mientras el furano se desarrolla mediante peroxidación lipídica y degradación de carbohidratos como la glucosa, la lactosa y la fructosa (Gianazza *et al.*, 2019; Santonicola & Mercogliano, 2016). Por otro lado, el FFA se puede formar a partir del HMF (Albouchi & Murkovic, 2020) y mediante la degradación térmica de ácidos orgánicos como el ácido quínico y cafeico en la matriz del café (Lachenmeier *et al.*, 2020). Las vías de formación de estos compuestos serán analizadas en detalle en el Capítulo 4.

Además de los efectos genotóxicos y carcinogénicos mencionados anteriormente, estas sustancias neoformadas pueden tener otros impactos negativos significativos en la salud humana. Entre estos efectos adversos, se ha observado que algunos de estos compuestos pueden causar daños en el sistema nervioso, lo que podría resultar en problemas neurológicos a largo plazo. Asimismo, se han documentado problemas reproductivos asociados con la exposición, lo que subraya la importancia de controlar su presencia en los alimentos. Dado el potencial impacto en la salud asociado con la presencia de estos compuestos en los alimentos, se han establecido límites permisibles de concentración en productos como los granos de café tostados. En el caso de la acrilamida (AA), la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) ha determinado un valor de referencia de 249 $\mu\text{g}/\text{kg}$, mientras que la Comisión Europea ha establecido un límite de 400 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (European Food Safety Authority, 2015; Unión Europea, 2017). Para el furano, los niveles reportados en café varían entre 600 a 4000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (da Costa *et al.*, 2023). Para otros compuestos, Lachenmeier *et al.* (2019), reporto concentraciones en café tostado de 40-84 mg/kg para HMF, 70-2231 mg/kg para FFA y 130-470 $\mu\text{g}/\text{kg}$ para AA. Estudios adicionales han reportado valores más bajos de AA, en un rango de 43,55-207,14 $\mu\text{g}/\text{kg}$ (Barrios *et al.*, 2023). De igual manera, para el cacao tostado se han reportado valores de AA con rangos de concentración entre 628-922,2 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Granvogl & Schieberle, 2007), para HMF de 260 mg kg^{-1} y para FFA de 0,02 mg kg^{-1} .

Estas variaciones en la concentración de compuestos neoformados dependen de múltiples factores, incluyendo las condiciones de procesamiento térmico y la composición química de la materia prima. En los siguientes apartados se abordarán en detalle varios aspectos fundamentales relacionados con los NFCs. En primer lugar, se examinarán los factores que influyen en la formación de estos compuestos, proporcionando una comprensión más profunda de las condiciones que favorecen su aparición. Posteriormente, se realizará una comparación exhaustiva entre la presencia de compuestos neoformados en el café y el cacao, dos productos ampliamente consumidos y que han sido objeto de considerable

atención en este contexto. Finalmente, se analizará el impacto de los compuestos neoformados presentes en el café en la salud humana, explorando tanto los riesgos potenciales como las posibles medidas preventivas.

Factores que influyen en la formación de compuestos neoformados

El desarrollo de compuestos neoformados (NFCs) durante el procesamiento térmico de los alimentos está altamente influenciado por la composición química de la materia prima (da Costa *et al.*, 2023; Goodman & Yeretizian, 2015). En el caso del café y cacao, este fenómeno está determinado por la presencia y concentración de precursores clave como azúcares reductores, ácidos orgánicos y aminoácidos específicos. También, durante el proceso de tostado, las variables de tiempo y temperatura, así como el pH, influyen en el desarrollo y contenido de estos compuestos (Maan *et al.*, 2022; Timmermann *et al.*, 2021; Krishnahumar & Visvanathan, 2014).

Los azúcares reductores y los aminoácidos desempeñan un papel crucial en la formación de compuestos neoformados (NFCs) como acrilamida, hidroximetilfurfural (HMF), furano y alcohol furfurílico durante el procesamiento térmico de alimentos como el café y el cacao. Los azúcares reductores, como la glucosa y la fructosa, actúan como precursores esenciales en la reacción de Maillard y en la degradación térmica de carbohidratos, promoviendo la formación de HMF, furano a partir de la deshidratación y fragmentación de hexosas y pentosas. Por otro lado, los aminoácidos, especialmente la asparagina, son determinantes en la producción de acrilamida a través de su descarboxilación y desaminación en presencia de azúcares (Kocadağlı & Gökmen, 2022). La formación de furanos se ve favorecida por la disponibilidad de aminoácidos, ácidos grasos y carbohidratos, mediante la degradación térmica o descomposición (Yaylayan, 2006), a temperaturas generalmente altas. Además, la interacción entre los azúcares y aminoácidos influye en la formación de alcohol furfurílico. Por otro lado, otro compuesto de interés es la manteca de cacao, que representa entre el 45 y 55% de la composición del grano, está formada principalmente por triglicéridos con ácidos grasos saturados (como el esteárico y palmítico) e insaturados (como el oleico), los cuales influyen en la transferencia de calor y en las reacciones químicas durante el procesamiento térmico. Los lípidos en el cacao pueden participar en reacciones de oxidación térmica, generando productos secundarios que pueden favorecer la formación de furano y alcohol furfurílico a partir de la degradación de ácidos grasos insaturados. En este sentido, la oxidación de los lípidos bajo altas temperaturas puede contribuir a la producción de radicales libres, que promueven la descomposición térmica de compuestos

volátiles y la generación de productos con impacto en el aroma y la estabilidad del cacao tostado.

La actividad de agua (a_w) es un factor clave en la formación de compuestos neoformados (NFCs) durante el procesamiento térmico de los alimentos, ya que influye en la movilidad de los reactivos y en la cinética de reacciones como la reacción de Maillard, la caramelización y la pirólisis. En sistemas con alta actividad de agua ($a_w > 0,6$), las reacciones de Maillard se ven favorecidas, ya que el medio acuoso permite una mayor difusión y disponibilidad de los precursores, como azúcares reductores y aminoácidos, promoviendo la formación de acrilamida y melanoidinas; los niveles bajos favorecen tanto la formación de HMF como de AA. Se ha reportado que una actividad de agua de 0,4, supone una condición óptima para que estos compuestos alcancen un punto máximo de formación, lo cual se asocia a procesos donde las temperaturas son superiores a 100°C , las cuales aceleran termodinámicamente su formación (Bassama *et al.*, 2011; da Costa *et al.*, 2023). Sin embargo, en sistemas con baja actividad de agua ($a_w < 0,3$), la reducción del contenido de agua puede acelerar reacciones térmicas como la degradación de azúcares y la deshidratación de furfural, favoreciendo la producción de hidroximetilfurfural (HMF), furano y alcohol furfurílico.

Finalmente, otro factor fundamental es el pH ya que influye en la velocidad y dirección de reacciones clave como la reacción de Maillard, la caramelización y la degradación térmica de compuestos orgánicos. En condiciones ácidas ($\text{pH} < 6$), la reacción de Maillard tiende a ralentizarse, lo que puede reducir la formación de acrilamida y melanoidinas, mientras que se favorece la degradación térmica de ácidos clorogénicos y la producción de compuestos como furano e hidroximetilfurfural (HMF). Estos pH bajos, pueden deberse a la disponibilidad de ácido cafeico y quinico en granos de café, los cuales también favorecen la formación de furfural y alcohol furfurílico en el proceso de tostado (Moon & Shibamoto, 2010). En cambio, en un pH alcalino ($\text{pH} > 7$), la reacción de Maillard se acelera, promoviendo la formación de acrilamida debido a una mayor reactividad de la asparagina, además de intensificar la producción de melanoidinas y compuestos volátiles que contribuyen al aroma y color del producto final. Por otro lado, en matrices alimentarias con pH altos entre 9 y 10, limitan este proceso, afectando seguidamente la formación de estos compuestos (Gökmen *et al.*, 2008).

Adicionalmente a estos factores relacionados a la composición química de los alimentos, el control de los parámetros de tostado, como el tiempo y la temperatura, son cruciales para modular la formación de NFCs y minimizar su

presencia. Durante el tostado, temperaturas altas ($>180^{\circ}\text{C}$) y tiempos prolongados favorecen la degradación térmica de azúcares y aminoácidos, lo que puede incrementar la producción de acrilamida a partir de la asparagina, así como la generación de HMF y furano por la deshidratación de carbohidratos. Lo ideal debería ser perfiles de tostado más rápidos y controlados que logren reducir la exposición de los precursores a condiciones extremas, limitando la conversión de azúcares y aminoácidos en productos de degradación perjudiciales. Sin embargo, la optimización del tiempo y la temperatura en el tostado de cacao y café para reducir la presencia de HMF, furano y acrilamida es un proceso complejo que requiere una cuidadosa consideración de múltiples factores. Para el tostado del café, las investigaciones indican que los tuestes más claros tienden a tener un mayor contenido de acrilamida, mientras que los tuestes más oscuros contienen niveles más altos de alcohol furfurílico (FA), furano e hidroximetilfurfural (HMF) (Lachenmeier *et al.*, 2019). Esto presenta un desafío en la optimización del proceso de tostado, ya que la reducción de un contaminante puede conducir a un aumento de otros. Por lo tanto, las medidas de mitigación deben considerar todos los contaminantes simultáneamente en lugar de centrarse únicamente en la acrilamida. Curiosamente, los estudios sobre el procesamiento del cacao han demostrado que los niveles de acrilamida pueden disminuir durante el almacenamiento, particularmente en el café y el cacao en polvo. Por ejemplo, las concentraciones de acrilamida cayeron de 305 a 210 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en el café y de 265 a 180 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en el cacao en polvo después de 3 y 6 meses de almacenamiento, respectivamente (Hoenicke y Gattermann, 2005). Esto sugiere que el tiempo de almacenamiento posterior al tostado podría ser un factor adicional a considerar para reducir los niveles de acrilamida.

La optimización de las condiciones de tostado tanto para el cacao como para el café requiere un enfoque equilibrado. Si bien los tuestes más ligeros pueden reducir la formación de HMF, furano y FA, pueden aumentar el contenido de acrilamida. Por el contrario, los tuestes más oscuros pueden reducir la acrilamida, pero aumentar otros contaminantes. Una estrategia potencial podría implicar un perfil de tostado moderado seguido de un período de almacenamiento adecuado para permitir la reducción natural de la acrilamida.

Lo anterior evidencia que la formación de NFCs en productos tostados como el café y el cacao está influenciada por una compleja interacción de factores, incluyendo la composición química de la materia prima, la disponibilidad de precursores clave (azúcares reductores, aminoácidos y ácidos orgánicos), la actividad de agua, el pH, la presencia de lípidos y las condiciones del proceso

térmico. La optimización de estos parámetros es esencial no solo para mejorar la calidad sensorial del producto final, sino también para mitigar la presencia de compuestos no deseados como la acrilamida, el furano, el alcohol furfurílico y el HMF, que pueden representar riesgos para la salud. Sin embargo, aunque el café y el cacao comparten ciertos mecanismos en la formación de NFCs, sus diferencias en composición, especialmente en contenido de azúcares, proteínas y grasas, generan perfiles distintos de estos compuestos durante el tostado.

Presencia de compuestos neoformados en café y cacao en Huila, Colombia

El análisis de la presencia y concentración de compuestos neoformados (NFCs) en alimentos de alto consumo, como el café y el cacao, representa un primer paso fundamental para evaluar el impacto del procesamiento térmico en la calidad química y seguridad del producto. Este análisis permite obtener un perfil cuantitativo de compuestos como acrilamida, furano e hidroximetilfurfural (HMF), cuya formación está directamente influenciada por las condiciones de tostado y la composición de la materia prima. Además, la evaluación de NFCs no solo proporciona información sobre la seguridad del producto, sino que también puede servir como una herramienta para optimizar los parámetros de procesamiento, con el objetivo de minimizar la presencia de compuestos no deseados sin comprometer las propiedades sensoriales y nutricionales. En este sentido, se ha cuantificado la concentración de acrilamida (AA), alcohol furfurílico (FFA), 5-hidroximetilfurfural (HMF) y 2-furaldehído (2-FA) en granos de café y cacao tostados provenientes de diferentes empresas tostadoras ubicadas en las zonas norte, centro y sur del departamento de Huila, Colombia.

Los resultados obtenidos muestran que los niveles de acrilamida (AA) en ambas matrices no presentan diferencias estadísticamente significativas ($P > 0,05$), lo que indica que la concentración de este compuesto no depende exclusivamente de la naturaleza de la matriz alimentaria, sino que está influenciada por una combinación de otros factores. Entre estos, destacan las condiciones de procesamiento térmico, que incluyen variables como la temperatura, el tiempo de tostado y la tasa de calentamiento, las cuales pueden modular la formación y degradación de la acrilamida. Además, la composición química inicial de los granos, en particular la disponibilidad de precursores clave, como la asparagina y los azúcares reductores, también desempeña un papel determinante en la generación de este compuesto. Asimismo, la intensidad del tueste puede afectar la estabilidad de la acrilamida, ya que exposiciones prolongadas a temperaturas elevadas pueden favorecer su degradación en fases avanzadas del tostado. Estos hallazgos sugieren que, más allá de la matriz en sí, son las interacciones entre

los precursores químicos y las condiciones de procesamiento las que regulan la formación final de acrilamida en estos productos (Figura 1A). El valor promedio obtenido de AA en café fue de $249,15 \pm 159,90 \mu\text{g/kg}$ (Figura 1A), valor similar al promedio reportado por la EFSA ($249 \mu\text{g kg}^{-1}$) y a los reportados por Lachenmeier *et al.* (2019) con rangos entre $130\text{-}470 \mu\text{g kg}^{-1}$. Sin embargo, algunas muestras se encontraron por encima del límite permitido por la Comisión Europea de $400 \mu\text{g/kg}$ para AA en café tostado (Unión Europea, 2017) y del rango reportado $43,55\text{-}207,14 \mu\text{g/kg}$ para cafés arábicas de la misma región.

Por otro lado, en el cacao el valor promedio obtenido de AA fue de $249,41 \pm 281,76 \mu\text{g/kg}$ (Figura 1A), similar a lo reportado por Granvogl & Schieberle, (2007), de $62,8\text{-}922,2 \mu\text{g/kg}$. Es importante mencionar que para el cacao no se han establecido valores de referencia como se ha hecho en café, pero se puede considerar que los valores obtenidos por encima de $500 \mu\text{g/kg}$ de AA indican altas concentraciones de este NFCs.

El FFA, HMF y 2-FA, presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.05$) entre granos de café y cacao tostados (Figura 1B, 1C, 1D). Los contenidos promedios de FFA, HMF y 2-FA para café fueron de $504.87 \pm 49.81 \text{ mg/kg}$, $36.85 \pm 128.79 \text{ mg/kg}$ y $56.10 \pm 18.49 \text{ mg/kg}$, respectivamente, encontrándose por encima de los reportados para HMF y FFA ($40\text{-}84 \text{ mg/kg}$ y $70\text{-}223 \text{ mg/kg}$ respectivamente) para cafés con tueste bajos y medios (Lachenmeier *et al.*, 2019).

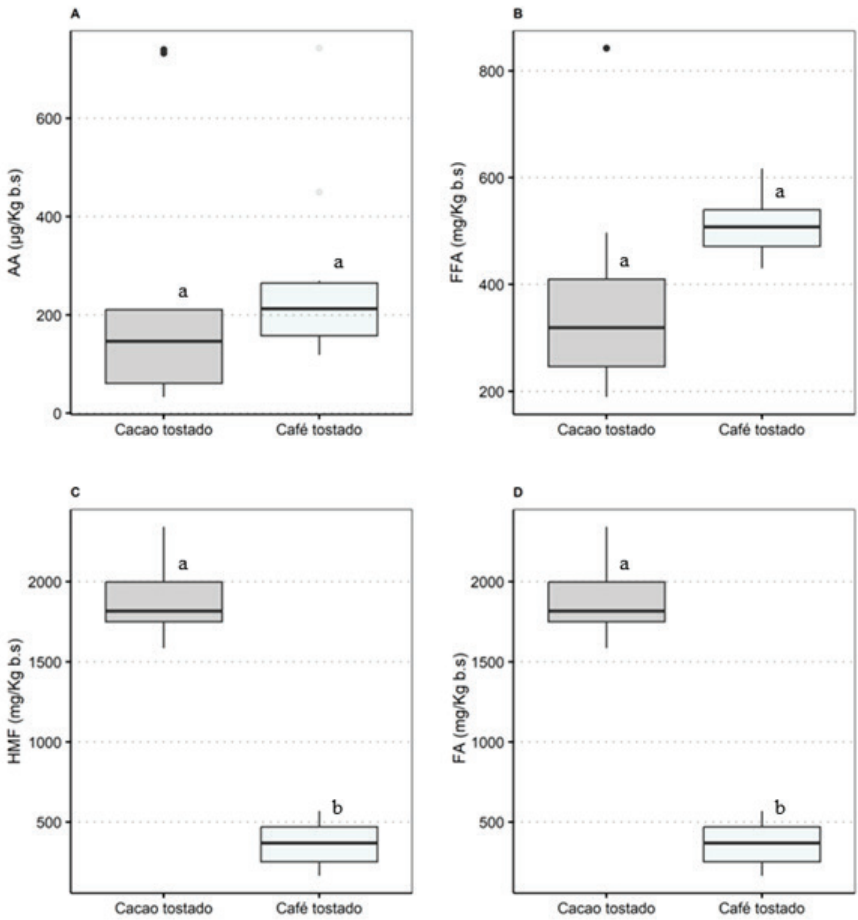
Mientras que en cacao, los promedios de FFA, HMF y 2-FA fueron de $375.85 \pm 198,17 \text{ mg/kg}^{-1}$, $1890.15 \pm 224 \text{ mg/kg}$ y $34.84 \pm 7.36 \text{ mg/kg}$, respectivamente. Encontrándose igualmente por encima de otros valores reportados por Okaru & Lachenmeier (2018) y Urbańska & Kowalska, (2021). De estos resultados se concluye que el café tostado presenta mayores contenidos de AA, FFA y 2-FA, si se comparan con el cacao. Las diferencias observadas pueden deberse a muchos factores como se discutió anteriormente, la composición química inicial, la disponibilidad de precursores y las condiciones de tostado.

El café, con un mayor contenido de polisacáridos estructurales como celulosa y hemicelulosa, libera pentosas durante el tostado, promoviendo la formación de 2-FA a partir de la deshidratación térmica de estos azúcares y de FFA por la reducción de furfural; además, el tostado del café se realiza a temperaturas más elevadas ($190\text{-}230^\circ\text{C}$), lo que favorece la conversión de furfurales en estos compuestos.

En cambio, el cacao, con un mayor contenido de azúcares solubles, especialmente sacarosa, genera HMF en concentraciones más altas, ya que durante el tostado esta se hidroliza en glucosa y fructosa, facilitando su degradación térmica y participación en la caramelización y la reacción de Maillard. Además, mientras que el café se tuesta a temperaturas más altas en tiempos más cortos, favoreciendo la transformación de HMF en productos posteriores, el cacao se somete a un tostado más prolongado a temperaturas más bajas (120-150°C), lo que permite una mayor acumulación de HMF.

Otro factor determinante en la presencia de compuestos neoformados (NFCs) en el café corresponde al proceso de elaboración de la bebida, ya que la extracción con

Figura 1. Concentraciones de NFCs en granos de café y cacao tostados procedentes de diferentes empresas tostadoras de Huila-Colombia

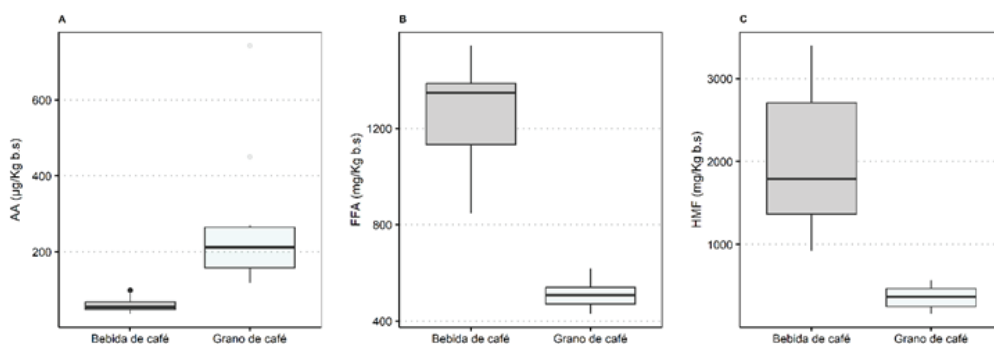


agua caliente modifica significativamente la concentración de estos compuestos en comparación con el grano tostado. Como se observa en la figura 2, el contenido de acrilamida (AA) en la bebida disminuyó notablemente con respecto al grano tostado, debido a la combinación de solubilidad diferencial, volatilización y posibles reacciones secundarias que ocurren durante la preparación. En particular, la concentración de AA en la bebida fue de $61,04 \pm 18,24 \mu\text{g/kg}$, lo que representa aproximadamente el 24% del contenido inicial en el grano tostado (Figura 2A). Esta reducción puede atribuirse en parte a la degradación térmica natural de la acrilamida, un fenómeno previamente reportado en la literatura (Chaves-Ullate *et al.*, 2015; Gökmen *et al.*, 2006).

Sin embargo, el tiempo de extracción y la relación agua/café parecen constituir factores aún más influyentes, ya que extracciones más cortas pueden limitar la disolución total de la acrilamida en la bebida. En este sentido, los métodos de preparación con contacto prolongado entre el agua y el café, como el cold brew, han demostrado presentar concentraciones más elevadas de acrilamida en comparación con preparaciones rápidas como el espresso o el café filtrado (Kang *et al.*, 2020). Esto se debe a que, a pesar de realizarse a temperaturas más bajas, los tiempos prolongados de extracción favorecen la liberación de más compuestos solubles en la bebida.

A pesar de que el agua es un solvente eficiente para la extracción de múltiples compuestos del café, no necesariamente extrae toda la acrilamida presente en el grano, lo que explica la diferencia entre el contenido de AA en el grano tostado y la bebida final (Soares *et al.*, 2015). Estos hallazgos resaltan la importancia del método de preparación sobre la composición química del café y sugieren

Figura 2. Efecto de la preparación de la bebida de café en la concentración de los NFCs



que, aunque la acrilamida se reduce durante la extracción, su concentración en la bebida final puede variar según las condiciones de preparación. Esto tiene implicaciones relevantes tanto para la calidad del producto como para la evaluación de su seguridad alimentaria.

Para el caso del FFA y HMF, sus concentraciones aumentaron con la preparación de la bebida, donde presentaron valores de $1269,35 \pm 192,34$ mg/kg⁻¹ y $2019,7 \pm 801,43$ mg/kg⁻¹, respectivamente (Figura 2B y 2C). El incremento en la concentración de FFA en la bebida de café puede atribuirse a la presencia de polifenoles, en particular ácido quínico y ácido cafeico, los cuales pueden influir en su formación a través de procesos de degradación térmica durante la preparación de la infusión. Se ha observado que estos compuestos fenólicos pueden favorecer la conversión de precursores de furfurales en FFA en rangos de pH entre 3,69 y 5,22 (Moon & Shibamoto, 2010), valores característicos del café preparado. Durante la extracción con agua caliente, la solubilización de estos ácidos orgánicos modifica la acidez del sistema, lo que puede favorecer reacciones de reducción de furfural a FFA, incrementando su concentración en la bebida en comparación con el grano tostado. Además, la temperatura y el tiempo de extracción influyen en la liberación diferencial de FFA desde la matriz sólida al líquido.

El aumento en la concentración de HMF en la bebida de café puede estar relacionado con la naturaleza ácida del sistema y la presencia de azúcares reductores, como glucosa y fructosa, los cuales actúan como precursores clave en su formación. En un entorno con pH ácido, característico del café (rango aproximado de 4,5-5,5), la formación de HMF se ve favorecida debido a la degradación térmica de los carbohidratos a través de la enolización 1,2 y la deshidratación de azúcares reductores (Capuano & Fogliano, 2011; Park *et al.*, 2021). En este proceso, la glucosa y la fructosa sufren una serie de reacciones químicas que conducen a la formación de 3-deoxiosona, un intermedio altamente reactivo y determinante en la conversión de hexosas en HMF. A medida que avanza la extracción con agua caliente, este compuesto experimenta una pérdida progresiva de grupos hidroxilo, lo que conduce a la ciclización y posterior formación de HMF. Además, la intensidad de este fenómeno puede verse modulada por el método de preparación del café, ya que tiempos de extracción más prolongados y temperaturas elevadas pueden favorecer la degradación térmica de azúcares y aumentar la acumulación de HMF en la bebida.

Otro factor determinante en la variabilidad del contenido de NFCs es el lugar de cultivo, ya que las condiciones agroclimáticas, la composición del suelo y los

factores genéticos de la planta pueden influir en la concentración de precursores clave involucrados en la formación de estos compuestos durante el procesamiento térmico. Para evaluar estas diferencias, se analizaron muestras de cacao tostado procedentes de diversas regiones del Huila, considerando múltiples variables fisicoquímicas, incluyendo NFCs y otros compuestos de interés. El análisis se realizó utilizando un Análisis de Componentes Principales (PCA), lo que permitió reducir la dimensionalidad de los datos y detectar patrones de variabilidad en función de las características químicas de las muestras. Posteriormente, se aplicó una agrupación difusa (*fuzzy clustering*) empleando las variables latentes PC1 a PC4, con el objetivo de identificar subgrupos y tendencias en la composición química del cacao. El análisis permitió visualizar que los primeros dos componentes principales (PC1 y PC2) explicaron el 44,8% de la variabilidad total, lo que indica que una parte significativa de las diferencias observadas entre las muestras puede atribuirse a estos factores clave. El gráfico de puntuación reveló una clara diferenciación entre las muestras según su región de origen. En particular, las muestras de Íquira, Paicol, Tello y Yaguará se ubicaron en las partes superiores de los cuadrantes I y II, mientras que las muestras de Campoalegre, Nátaga, Neiva y Rivera se posicionaron en las partes inferiores de los cuadrantes III y IV (Fig. 3A). Esta distribución sugiere que los perfiles químicos de los granos de cacao presentan patrones regionales definidos, lo que refuerza la hipótesis de que las condiciones edafoclimáticas y las particularidades del cultivo influyen en la composición química del cacao y, por ende, en la formación de NFCs tras el procesamiento térmico.

El análisis de agrupación difusa (*fuzzy clustering*) utilizando los primeros cuatro componentes principales (PC1:PC4), que en conjunto explicaron aproximadamente el 70% de la varianza total. Este análisis permitió identificar tres agrupaciones distintas, basadas en el índice de partición lo que sugiere que existen perfiles químicos diferenciados según la región de cultivo, revelando que:

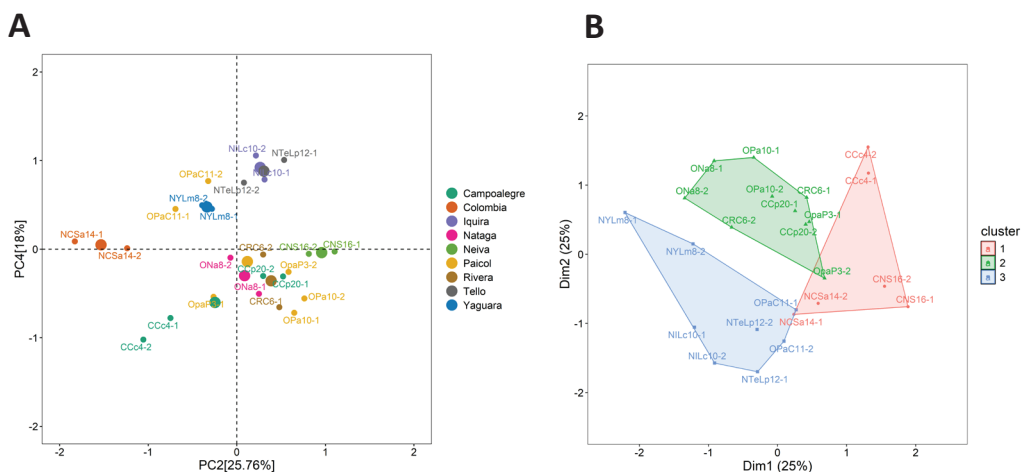
- Clúster 1: agrupa muestras de Campoalegre, Colombia y Neiva,
- Clúster 2: contiene muestras de Paicol, Nátaga y Rivera,
- Clúster 3: reúne muestras de Íquira, Tello y Yaguará.

La diferenciación observada entre estos grupos indica que la composición fisicoquímica del cacao está directamente influenciada por su origen geográfico, lo que tiene implicaciones en la calidad final del grano y en la presencia de NFCs. Por otro lado, otros factores clave son temperatura de tostado (110-150°C) y el tiempo (30-120 min) utilizados en la región, que influyen en la degradación de los fenoles y la capacidad antioxidante debido a la naturaleza termolábil de

sus moléculas (Barišić *et al.*, 2019). El proceso de tostado en Huila-Colombia se puede realizar de manera artesanal (en pailas) o en tostadores de tambor, dependiendo de los recursos económicos de los cacaocultores. La falta de tecnología en este proceso no permite el control de parámetros claves como la temperatura, afectando la calidad fisicoquímica y sensorial del producto final. Por último, el genotipo del cacao también juega un papel importante, ya que la variedad Forastero pierde más grupos aldehídos asociados a carbohidratos durante el tostado que la variedad Trinitario (Oracz & Nebesny, 2019).

Finalmente, la formación y acumulación de NFCs en café y cacao están fuertemente influenciadas por factores químicos, térmicos y de origen geográfico. En el café, la preparación de la bebida introduce nuevas variaciones en la concentración de NFCs debido a la solubilidad diferencial, volatilización y posibles reacciones secundarias durante la extracción con agua caliente. Diferentes métodos de preparación pueden modificar la presencia de estos compuestos, con extracciones más prolongadas favoreciendo la retención de ciertos NFCs, como la acrilamida, mientras que procesos de alta temperatura y presión pueden reducir su contenido en la infusión final. Por otro lado, la región geográfica de origen es otro factor importante, como se evidenció en el análisis de las muestras de cacao. El origen geográfico de los granos juega un papel clave en la disponibilidad de precursores como azúcares, aminoácidos y compuestos fenólicos.

Figura 3. Agrupación de muestras de cacao de muestras obtenidos a partir de **(A)** PCA utilizando PC1 frente a PC2, **(B)** clustering difuso basado en variables latentes PC1 a PC4



Impacto de los compuestos neoformados presentes en el café, en la Salud

Habiendo analizado los factores que influyen en la formación y presencia de compuestos NFCs en café y cacao, es fundamental evaluar su impacto en la salud humana a partir de su ingesta diaria estimada (EDI) en la población. En esta sección, se abordarán tanto los NFCs (AA, el HMF y FFA) con potenciales efectos adversos, como también los compuestos bioactivos presentes en el café, específicamente los ácidos clorogénicos (ACG) y la cafeína, los cuales han sido asociados con diversos beneficios para la salud. A partir de estos análisis, se busca proporcionar una visión integral de cómo el consumo de café puede impactar la salud de la población, considerando tanto los posibles riesgos asociados a NFCs como los efectos potencialmente beneficiosos de los compuestos bioactivos, con el fin de contextualizar su relevancia.

La Tabla 1 ilustra los resultados de los valores de ingesta diaria estimada (EDI, por sus siglas en inglés). La estimación de la ingesta generalmente implica multiplicar el volumen de café consumido por la concentración del analito en la bebida, ajustado al peso corporal (bw) del consumidor. Esta ingesta se expresa en microgramos por kilogramo de peso corporal por día ($\mu\text{g kgbw}^{-1} \text{ día}^{-1}$). La ecuación 1, ilustra el cálculo del EDI, donde C_i es la concentración de los NFCs en el café o del compuesto bioactivo ($\mu\text{g g}^{-1}$), C_{ri} representa el consumo diario de café (g día^{-1}), y BW se refiere al peso corporal promedio (kg).

$$EDI = \frac{C_i * C_{ri}}{BW} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Varios factores pueden influir en los niveles de ingesta individual, siendo la edad y el sexo variables asociadas con la cantidad y el tipo de trabajo que realizan las personas, lo cual puede facilitar o propiciar mayores hábitos de consumo de café. En este sentido, para poder calcular el EDI, se han tomado los datos de una encuesta de consumo de café realizada de forma presencial en la ciudad de Neiva, Colombia. Esta encuesta tuvo como objetivo caracterizar los patrones de consumo de café entre los habitantes mayores de 18 años, incluyendo la frecuencia, cantidad, métodos de preparación preferidos y lugares habituales de consumo. Un total de 725 consumidores habituales de café participaron en el estudio, abarcando las cuatro zonas principales de la ciudad (norte, centro, sur y oriente). La muestra fue diseñada con base en datos del censo poblacional de 2018 del DANE y empleando un modelo estadístico para poblaciones finitas que consideró un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 3,65%. Los datos obtenidos permitieron caracterizar la población encuestada por edad, sexo

y estrato socioeconómico, así como establecer los perfiles de consumo de café más representativos. Por otro lado, con el fin de evaluar la presencia de NFCs se prepararon bebidas de café a partir de quince muestras de *Coffea arabica* recolectadas en diversas empresas tostadoras de la región del Huila. Las bebidas se prepararon siguiendo el método de “olla reposada”, identificado como el de mayor uso entre los encuestados. Este método consistió en añadir agua hirviendo (100°C) a 7 g de café molido por cada 100 mL de agua tipo I, mezclar con una varilla de vidrio hasta integrar completamente, y dejar reposar la infusión durante aproximadamente 35 minutos, hasta alcanzar una temperatura ambiente de 25°C. Esta forma de preparación fue seleccionada para representar con fidelidad las condiciones reales de consumo y, por tanto, estimar de manera más precisa la exposición de la población a los NFCs presentes en las bebidas.

Con este procedimiento se lograron calcular los EDI para la población general, según el sexo, rango de edad y rangos de edad por sexo. Los resultados evidenciaron que tanto para compuestos bioactivos (ACG y cafeína), como para AA, HMF y FFA no existe diferencias significativas entre los grupos de género y edad, lo que indica que la exposición a estos compuestos es relativamente homogénea dentro de la población analizada (Tabla 1). En el caso del HMF, el EDI en la población de Neiva, Colombia fue de 211,2 $\mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en la mediana, mientras que el percentil 95 (P95) alcanzó 858,8 $\mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$, lo que representa la exposición en el 5% de la población con el mayor consumo de café. Si bien la mediana del EDI para HMF se encuentra dentro del rango considerado admisible por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, >540 $\mu\text{g}/\text{día}$), lo que indica que el 50% de la población analizada tiene una exposición dentro de los límites aceptables, la situación es diferente para el grupo de alto consumo. En este caso, el P95 supera en aproximadamente el doble el valor de referencia, lo que sugiere un mayor riesgo de exposición y la posibilidad de efectos adversos en la salud en este segmento de la población. En comparación con otros estudios, los valores de EDI P95 para HMF fueron significativamente altos, si se comparan con los reportados en la población de china 162,9 $\mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$, por medio del consumo de café (Liu *et al.*, 2023). Esta diferencia puede atribuirse a factores como patrones de consumo, tipos de café disponibles en el mercado, métodos de preparación y concentraciones de HMF en los productos comercializados.

El FFA presentó 302,4 $\mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y 1229,9 $\mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$, para la mediana y el P95 de la población; encontrando solo la mediana dentro del rango seguro propuesto (<500 $\mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$) por la JEFCA. La distribución de género por grupo etario, mostró que las mujeres en el rango de edad entre 50 y 62 (386,2

Tabla 1. Estimación de la ingesta de HMF, FFA, ACG y cafeína en la población de Neiva, Colombia, mediante la ingesta de café

	Mediana ± IQR						P95			
		FFA	HMF	ACG	CAF	HMF	FFA	ACG	CAF	
General	Total	302,4±437,7	211,2±305,6	4,1±5,9	4,1±5,9	858,9	1229,9	16,6	16,5	
Sexo	Female	315,8±467,8	220,5±326,7	4,3±6,3	4,2±6,3	826,9	1184,1	15,9	16,7	
	Male	292,9±408,8	204,5±285,5	3,9±5,5	3,9±5,5	865,2	1238,9	16,7	16,1	
Edad	18-29	252,1±482,1	176,1±336,6	3,4±6,5	3,4±6,5	838,1	1200,1	16,2	16,8	
	30-39	258,4±477,4	180,4±333,3	3,5±6,4	3,5±6,4	888,3	1272,0	17,2	17,1	
	40-49	247,7±348,6	172,9±243,5	3,3±4,7	3,3±4,7	639,1	915,1	12,4	12,3	
	50-62	386,2±371,3	269,7±259,3	5,2±5,0	5,2±5,0	737,8	1056,6	14,3	14,3	
	>63	369,1±540,4	257,8±377,4	4,9±7,3	4,9±7,3	1042,8	1493,4	20,2	20,2	
	Rango de edad por sexo									
	18-29	253,6±398,2	177,1±278,1	3,4±5,4	3,4±5,5	692,3	991,4	13,4	13,8	
Masculino	30-39	230,1±383,5	160,7±267,8	3,1±5,2	3,1±5,2	894,5	1280,9	17,3	17,5	
	40-49	271,7±286,2	189,8±199,8	3,7±3,9	3,6±3,9	671,0	960,9	12,9	14,0	
	50-62	336,6±316,9	235,1±221,3	4,5±4,3	4,5±4,3	720,3	1031,5	13,9	14,3	
	>63	392,2±668,1	273,9±466,5	5,3±9,0	5,3±9,4	1187,6	1700,6	22,9	23,0	
	18-29	252,1±513,9	176,1±358,9	3,4±6,9	3,4±6,9	973,8	1394,5	18,8	18,7	
	30-39	309,3±513,3	216,0±358,4	4,2±6,9	4,2±7,3	866,7	1241,0	16,8	17,1	
	40-49	241,4±409,2	168,5±285,8	3,3±5,5	3,2±5,8	633,1	906,6	12,2	12,2	
Femenino	50-62	392,2±382,3	273,9±266,9	5,3±5,2	5,3±5,2	716,7	1026,3	13,9	15,5	
	>63	322,0±429,8	224,9±300,2	4,4±5,8	4,3±5,7	858,1	1228,8	16,6	16,5	

Valores de ingesta expresados como mediana ± índice intercuartílico. Unidades de la ingesta µg kgbw⁻¹ day⁻¹

$\mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$, $269,8 \mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$) presentaron la mayor ingesta de FFA y HMF, respectivamente; sin embargo, no superaron el umbral de referencia para $\text{FFA} > 500 \mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (FAO/WHO, 2000) y $\text{HMF} > 540 \mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (EFSA, 2005). Por otro lado, toda la población en los valores calculados para el P95, superó el umbral de dosificación diaria considerada como segura para ambos compuestos.

Finalmente, se tienen los compuestos bioactivos, ácidos clorogénicos y cafeína, que presentaron valores de $4,08 \mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y $16,60 \mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$ para la mediana y el P95 de la población, respectivamente (Tabla 1). La exposición dietaria a cafeína por consumo de café, evidencia, en los resultados obtenidos en la presente investigación, que los niveles estimados se encuentran muy por debajo del umbral de seguridad establecido por la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA). Según la EFSA (2017), una ingesta de hasta $5700 \mu\text{g kg}^{-1}$ de peso corporal por día (equivalente a $5,7 \text{ mg kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$) no representa un riesgo para la salud de adultos sanos (EFSA, 2017), y por el contrario, el consumo moderado de cafeína ha sido asociado con efectos beneficiosos sobre el sistema nervioso central, como mejoras en la concentración, el estado de alerta y el rendimiento cognitivo (EFSA, 2015; Ye *et al.*, 2023).

En este estudio, los valores de ingesta estimada de cafeína en la población evaluada mostraron una mediana de $4,1 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y un percentil 95 (P95) de $16,6 \mu\text{g kg}^{-1} \text{ día}^{-1}$, cifras que representan menos del 0,3% del valor de referencia propuesto por EFSA. Estos resultados indican que el consumo actual de café entre los habitantes de Neiva no implica riesgos asociados a la cafeína, incluso en los consumidores de niveles altos (P95). No obstante, cabe señalar que otros grupos poblacionales, como adolescentes, mujeres embarazadas o personas con condiciones médicas específicas, podrían tener umbrales de seguridad más bajos, por lo cual futuras investigaciones podrían considerar estos subgrupos para una evaluación más precisa del riesgo-beneficio asociado al consumo de cafeína.

Para el caso de los ácidos clorogénicos no se ha reportado un valor de referencia asociado a niveles seguros de ingesta. Los valores encontrados en este estudio son elevados en comparación con la ingesta de otros polifenoles en poblaciones, donde se reportaron valores de ingesta de ácidos fenólicos de $7947,1 \mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$, de los cuales el 88,5% correspondía a ácidos hidroxycinámicos, asociados a los ácidos clorogénicos, con una ingesta de $7029,3 \mu\text{g kg bw}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (Witkowska *et al.*, 2015), donde el consumo de café contribuye con un 70% de dicha ingesta. En Francia, se ha reportado valores de ingesta de ácidos fenólicos $9234,1 \mu\text{g kg bw}^{-1}$

día⁻¹ para la población en el rango de edad entre 45 y 60 años, correspondiendo a los ácidos hidroxicinámicos una ingesta de 8656,1 µg kg bw⁻¹ día⁻¹, en la cual el consumo de café aportó un 83% (Pérez-Jiménez *et al.*, 2011).

Finalmente, en AA también se estimó la ingesta (Tabla 2), y a partir de los BMLD10 establecidos por la EFSA se calculó el margen de exposición (MOE), para efectos de neuropatía periférica (0,43 mg kgbw⁻¹day⁻¹) y efectos neoplásicos (0,17 mg kgbw⁻¹ day⁻¹) (EFSA, 2015; EFSA, 2011), mediante el consumo de café. El MOE se calcula como una relación entre dos factores (Ec. 1): la dosis a la cual se observa por primera vez un efecto adverso leve pero medible, conocida como el Límite Inferior de Confianza de la Dosis de Referencia al 10% (BMDL10), y la ingesta diaria de la sustancia evaluada (EDI).

$$MOE = \frac{BMLD_{10}}{EDI} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Para la población de la ciudad de Neiva-Colombia, el EDI de AA fue de 0,02 µg kgbw⁻¹ day⁻¹ y 0,09 µg kgbw⁻¹ day⁻¹, para la mediana y el P95, respectivamente (Tabla 2). Ambos valores dentro de los rangos de ingesta seguros establecidos, tanto por la EFSA, como la JEFCA para el P95 de 0,6-2,0 µg kg bw⁻¹ día⁻¹ y 0,6-1,8 µg kg bw⁻¹ día⁻¹, respectivamente. En la caracterización por género y edad, ninguna distribución presentó valores de ingesta por encima de las referencias, consideradas como seguras (EFSA, 2015; FAO/WHO, 2011).

Los valores de ingesta P95 calculados para la población evaluada, se encontraron similares a otras poblaciones del mismo país, Bogotá-Colombia con 0,01 µg kg bw⁻¹ día⁻¹ (Barón-Cortes *et al.*, 2021), y poblaciones separadas geográficamente, Turquía 0,27 µg kg bw⁻¹ día⁻¹ (Basaran *et al.*, 2022), España 0,04 µg kg bw⁻¹ día⁻¹ (Mesías & Morales, 2016) y Polonia 1,24 µg kg bw⁻¹ día⁻¹, representando el café el 19% de esta ingesta (Mojska *et al.*, 2010).

El MOE P95 para efectos neoplásicos y neuropatía periférica fue de 1763,7 y 4461,2 (Tabla 2), respectivamente. Teniendo en cuenta que valores de MOE < 10.000 podrían representar exposición, este porcentaje de la población podría estar expuesta a sufrir estos efectos por medio del consumo de café. Los valores de MOE obtenidos fueron significativamente menores, comparados con los reportados en la población de Santiago de Chile, para productos como panes, galletas, papas, maíz pira casero, entre otros (Barrios-Rodríguez *et al.*, 2021). Otro estudio realizado en la población de Corea donde se emplearon valores

de BMLD10 establecidos por El Comité Mixto FAO/OMS de Expertos en Aditivos Alimentarios (JECFA), obtuvo valores de 1471 y 2533, para patatas fritas, café, productos a base de té, galletas, tostadas, cereales para el desayuno y productos de chocolate (Lee & Kim, 2020), siendo estos similares a los calculados para este estudio. Sin embargo, para la población de China, mediante el consumo de vegetales, cereales y patatas se han reportado valores de MOE significativamente menores: 973 y 565 (Gao *et al.*, 2016). Para finalizar, se observa que el análisis del EDI para la acrilamida en la población no indica un riesgo de exposición general. Sin embargo, al considerar efectos específicos, se encuentra que las personas que consumen mayores volúmenes de café, es decir, aquellas por encima del percentil 95 superan los valores de ingesta considerados seguros.

Tabla 2. Estimación de la ingesta de acrilamida en la población de Neiva, Colombia, mediante el consumo de café

		Ingesta diaria		MOE P95	
		Mediana	P95	Neoplastic	Peripheral Neuropathy
General	Total	0,02±0,03	0,10	1763,74	4461,22
	Males	0,03±0,04	0,09	1832,11	4634,15
	Females	0,02±0,03	0,10	1751,00	4429,00
Rangos de edad					
	18-29	0,02±0,04	0,09	1809,06	4575,86
	30-39	0,02±0,04	0,10	1705,36	4313,55
	40-49	0,02±0,03	0,07	2370,38	5995,67
	50-62	0,03±0,03	0,08	2054,05	5195,53
	>63	0,03±0,04	0,12	1453,34	3676,09
Rangos de edad por sexo					
Masculino	18-29	0,02±0,03	0,08	2189,90	5539,17
	30-39	0,02±0,03	0,10	1695,75	4289,26
	40-49	0,02±0,02	0,08	2266,68	5733,36
	50-62	0,03±0,03	0,08	2111,47	5340,78
	>63	0,03±0,05	0,13	1275,56	3226,42
Femenino	18-29	0,02±0,04	0,11	1555,56	5539,17
	30-39	0,02±0,04	0,10	1748,37	4422,36
	40-49	0,02±0,03	0,07	2392,88	6052,57
	50-62	0,03±0,03	0,08	2116,95	5354,63
	>63	0,03±0,03	0,10	1765,39	4465,40

BMDL10 = 0,43 mg kgbw⁻¹ day⁻¹ para efectos de neuropatía periférica (EFSA 2015).

BMDL10 = 0,17 mg kgbw⁻¹ day⁻¹ para efectos neoplásicos (EFSA 2015).

Valores de ingesta expresados como mediana±índice intercuartílico

Unidades de ingesta: µg kgbw⁻¹ day⁻¹

Consideraciones finales

El análisis de los compuestos neoformados (NFCs) en café y cacao evidencia que su formación está influenciada por múltiples factores, incluyendo la composición química de la materia prima, las condiciones de tostado y, en el caso del café, el método de preparación de la bebida. La presencia de NFCs como acrilamida, hidroximetilfurfural (HMF) y el alcohol furfurílico (FFA) varía según la matriz y el proceso de transformación, mientras que la exposición a estos compuestos en la población depende de los hábitos de consumo. Aunque algunos NFCs han sido asociados con potenciales riesgos toxicológicos, el café también es una fuente importante de compuestos bioactivos como los ácidos clorogénicos y la cafeína, que han mostrado efectos beneficiosos para la salud.

La acrilamida ha evidenciado que su extracción podría verse limitada por los tiempos y temperaturas de extracción durante la preparación de la bebida. Sin embargo, las concentraciones de HMF y FFA podrían aumentar, lo cual podría ser consecuencia de reacciones térmicas como la caramelización o la degradación de ácidos, durante la preparación de la bebida cuando hay condiciones de acidez y temperaturas favorables. La estimación de ingesta de cafeína en el percentil 95 de la población supera el umbral de referencia establecido ($EDI > 4700 \mu\text{g kgbw}^{-1} \text{ day}^{-1}$). Igualmente, el análisis del P95 mostro que el 5% de la población analizada supera los límites de ingesta reportados como seguros, en relación con efectos de neuropatía periférica y neoplásicos ($MOE < 10000$). Adicionalmente, las ingestas de FFA ($EDI > 500 \mu\text{g kgbw}^{-1} \text{ day}^{-1}$) y HMF ($EDI > 540 \mu\text{g kgbw}^{-1} \text{ day}^{-1}$) se encuentran por encima de las ingestas consideradas seguras.

En general, los resultados de la EDI indican que, si bien la mayoría de la población se encuentra dentro de los rangos de exposición aceptables para ciertos NFCs, en grupos de alto consumo, la ingesta de HMF y acrilamida puede exceder los valores de referencia, lo que sugiere la necesidad de evaluar posibles implicaciones en la salud a largo plazo. En este contexto, se recomienda optimizar los procesos de tostado, ajustando la temperatura y el tiempo para minimizar la formación de NFCs sin comprometer las características sensoriales del producto, así como evaluar estrategias de mitigación que permitan disminuir la formación de este tipo de compuestos en matrices de alto consumo como el cacao y café.

Referencias

- Albouchi, A., & Murkovic, M. (2020). Investigation on the mitigation effects of furfuryl alcohol and 5-hydroxymethylfurfural and their carboxylic acid derivatives in coffee and coffee-related model systems. *Food Research International*, 137, 109444. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109444>
- Barišić, V., Kopjar, M., Jozinović, A., Flanjak, I., Ačkar, D., Miličević, B., Šubarić, D., Jokić, S., & Babić, J. (2019). The chemistry behind chocolate production. *Molecules*, 24(17), 3163. <https://doi.org/10.3390/molecules24173163>.
- Barón-Cortés, W. R., Vásquez-Mejía, S. M., & Suárez-Mahecha, H. (2021). Consumption study and margin of exposure of acrylamide in food consumed by the Bogotá population in Colombia. *Journal of Food Composition and Analysis*, 100, 103934. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.103934>
- Barrios-Rodríguez, Y. F., Gutiérrez-Guzmán, N., Amorocho-Cruz, C. M., Pedreschi, F., & Mariotti-Celis, M. S. (2023). Integrated effect of yeast inoculation and roasting process conditions on the neo formed contaminants and bioactive compounds of Colombian roasted coffee (*Coffea arabica*). *Food Research International*, 164, 112380. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112380>.
- Barrios-Rodríguez, Y. F., Pedreschi, F., Rosowski, J., Gómez, J. P., Figari, N., Castillo, O., & Mariotti-Celis, M. S. (2021). Is the dietary acrylamide exposure in Chile a public health problem? *Food Additives & Contaminants: Part A Chemistry, Analysis, Control, Exposure and Risk Assessment*, 38(7), 1126-1135. <https://doi.org/10.1080/19440049.2021.1914867>.
- Bassama, J., Brat, P., Bohuon, P., Hocine, B., Boulanger, R., & Günata, Z. (2011). Acrylamide kinetics in plantain during heating process: Precursors and effect of water activity. *Food Research International*, 44(5), 1452-1458. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.018>.
- Capuano, E., & Fogliano, V. (2011). Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural (HMF): A review on metabolism, toxicity, occurrence in food and mitigation strategies. *LWT - Food Science and Technology*, 44(4), 793-810. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.002>.
- Çelik, E. E., & Gökmen, V. (2020). Formation of Maillard reaction products in bread crust-like model system made of different whole cereal flours. *European Food Research and Technology*, 246(6), 1207-1218. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03481-4>.
- Chaves-Ullate, C., Irias-Mata, A., & Arias-Echandi, M.L. (2015). Formación de acrilamida durante el procesamiento de alimentos. Una revisión. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 25(2), 28-35.
- da Costa, D.S., Albuquerque, T.G., Costa, H.S., & Bragotto, A.P.A. (2023). Thermal contaminants in coffee induced by roasting: A review. *International Journal*

- of Environmental Research and Public Health*, 20(8), 5586. <https://doi.org/10.3390/ijerph20085586>
- EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM). (2015a). Scientific opinion on acrylamide in food. *EFSA Journal*, 13(6), 4104. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4104>
- EFSA. (2005). Opinion of the scientific panel on food additives, flavourings, processing aids and materials in contact with food (AFC) related to flavouring group evaluation 13 (FGE.13); Furfuryl and furan derivatives with and without additional side-chain substituents. *EFSA Journal*, 3(7), 215. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2005.215>
- EFSA. (2011). Update on furan levels in food from monitoring years 2004-2010 and exposure assessment. *EFSA Journal*, 9(9), 2347. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2347>.
- EFSA. (2015b). Scientific opinion on the safety of caffeine. *EFSA Journal*, 13(5), 4102. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4102>.
- EFSA. (2017). Scientific opinion on Flavouring group evaluation 49, revision 1 (FGE.49Rev1): Xanthine alkaloids from the priority list. *EFSA Journal*, 15(4), 4729. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2017.4729>.
- European Food Safety Authority. (2015). *EFSA explains risk assessment: Acrylamide in food*. EFSA. <https://www.efsa.europa.eu/en/corporate/pub/acrylamide150604>
- FAO/WHO. (2000). *Evaluation of certain food additives and contaminants*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240054585>
- FAO/WHO. (2011). *Evaluation of certain contaminants in food: seventy-second report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives*. World Health Organization.
- Gao, J., Zhao, Y., Zhu, F., Ma, Y., Li, X., Miao, H., & Wu, Y. (2016). Dietary exposure of acrylamide from the fifth Chinese total diet study. *Food and Chemical Toxicology*, 87, 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2015.11.013>.
- Gianazza, E., Brioschi, M., Fernandez, A.M., & Banfi, C. (2019). Lipoxidation in cardiovascular diseases. *Redox Biology*, 23, 101119. <https://doi.org/10.1016/j.redox.2019.101119>.
- Gökmen, V., & Palazoğlu, T. K. (2008). Acrylamide formation in foods during thermal processing with a focus on frying. *Food and Bioprocess Technology*, 1(1), 35-42. <https://doi.org/10.1007/s11947-007-0039-y>
- Gökmen, V., Palazoğlu, T.K., & Şenyuva, H.Z. (2006). Relation between the acrylamide formation and time-temperature history of surface and core regions of french fries. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 972-976. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.030>

- Goodman, B.A., & Yeretzian, C. (2015). Free radical processes in Coffee II-Liquids. In: V. R. Preedy (Ed). *Processing and impact on active components in food* (pp. 567-574). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404699-3.00068-8>.
- Granvogl, M., & Schieberle, P. (2007). Quantification of 3-aminopropionamide in cocoa, coffee and cereal products. *European Food Research and Technology*, 225, 857-863. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0492-9>.
- Hoenicke, K., & Gatermann, R. (2005). Studies on the stability of acrylamide in food during storage. *Journal of AOAC International*, 88(1), 268-273. <https://doi.org/10.1093/jaoac/88.1.268>
- Kang, D., Lee, H.-U., Davaatseren, M., & Chung, M.-S. (2020). Comparison of acrylamide and furan concentrations, antioxidant activities, and volatile profiles in cold or hot brew coffees. *Food Science and Biotechnology*, 29(1), 141-148. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00644-2>.
- Kocadağlı, T., & Gökmen, V. (2022). Formation of acrylamide in coffee. *Current Opinion in Food Science*, 45, 100842. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100842>
- Krishnakumar, T., & Visvanathan, R. (2014). Acrylamide in food products: A review. *Journal of Food Processing & Technology*, 5(7), 1000344. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000344>
- Lachenmeier, D.W., Schwarz, S., Teipel, J., Hegmanns, M., Kuballa, T., Walch, S.G., & Breitling-Utzmann, C.M. (2019). Potential antagonistic effects of acrylamide mitigation during coffee roasting on furfuryl alcohol, furan and 5-hydroxymethylfurfural. *Toxics*, 7(1),1. <https://doi.org/10.3390/toxics7010001>
- Lachenmeier, D.W., Teipel, J., Scharinger, A., Kuballa, T., Walch, S.G., Grosch, F., Bunzel, M., Okaru, A.O., & Schwarz, S. (2020). Fully automated identification of coffee species and simultaneous quantification of furfuryl alcohol using NMR spectroscopy. *Journal of AOAC International*, 103(2), 306-314. <https://doi.org/10.1093/JAOCINT/QSZ020>.
- Lee, S., & Kim, H.J. (2020). Dietary exposure to acrylamide and associated health risks for the Korean population. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(20), 1-11. <https://doi.org/10.3390/ijerph17207619>.
- Liu, Q., Zhou, P., Luo, P., & Wu, P. (2023). Occurrence of furfural and its derivatives in coffee products in China and estimation of dietary intake. *Foods*, 12(1), 200. <https://doi.org/10.3390/foods12010200>.
- Maan, A.A., Anjum, M.A., Khan, M.K.I., Nazir, A., Saeed, F., Afzaal, M., & Aadil, R.M. (2022). Acrylamide formation and different mitigation strategies during food processing: A review. *Food Reviews International*, 38(1), 70-87. <https://doi.org/10.1080/87559129.2020.1719505>.

- Mesías, M., & Morales, F.J. (2016). Acrylamide in coffee: Estimation of exposure from vending machines. *Journal of Food Composition and Analysis*, 48, 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.02.005>.
- Mojska, H., Gielecińska, I., Sonar, L., & Ołtarzewski, M. (2010). Estimation of the dietary acrylamide exposure of the polish population. *Food and Chemical Toxicology*, 48(8-9), 2090-2096. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.05.009>.
- Moon, J.-K., & Shibamoto, T. (2010). Formation of volatile chemicals from thermal degradation of less volatile coffee components: quinic acid, caffeic acid, and chlorogenic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(9), 5465-5470. <https://doi.org/10.1021/jf1005148>.
- Murkovic, M., & Bornik, M. A. (2007). Formation of 5-hydroxymethyl-2-furfural (HMF) and 5-hydroxymethyl-2-furoic acid during roasting of coffee. *Molecular Nutrition & Food Research*, 51(4), 390-394. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600251>
- Okaru, A.O., & Lachenmeier, D.W. (2018). Processing contaminants: Furfuryl alcohol. In: Melton, L., Shaidi, F. & Varelis, P. (Eds). *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 543-549). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21825-8>
- Oracz, J., & Nebesny, E. (2019). Effect of roasting parameters on the physicochemical characteristics of high-molecular-weight Maillard reaction products isolated from cocoa beans of different *Theobroma cacao* L. groups. *European Food Research and Technology*, 245(1), 111-128. <https://doi.org/10.1007/s00217-018-3144-y>.
- Park, S., Jo, A., & Lee, K.-G. (2021). Effect of various roasting, extraction and drinking conditions on furan and 5-hydroxymethylfurfural levels in coffee. *Food Chemistry*, 358, 129806. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129806>.
- Pérez-Jiménez, J., Fezeu, L., Touvier, M., Arnault, N., Manach, C., Hercberg, S., Galan, P., & Scalbert, A. (2011). Dietary intake of 337 polyphenols in French adults. *American Journal of Clinical Nutrition*, 93(6), 1220-1228. <https://doi.org/10.3945/ajcn.110.007096>.
- Santonicola, S., & Mercogliano, R. (2016). Occurrence and production of furan in commercial foods. *Italian Journal of Food Science*, 28(2), 155-177. <https://doi.org/10.14674/1120-1770/ijfs.v95>.
- Soares, C.M.D., Alves, R.C., & Oliveira, M.B.P.P. (2015). *Factors affecting acrylamide levels in coffee beverages*. In: Preedy, V.R. (Ed). *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 217-224). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00024-3>
- Timmermann, C.A.G., Mølck, S.S., Kadawathagedara, M., Bjerregaard, A.A., Törnqvist, M., Brantsæter, A.L., & Pedersen, M. (2021). A review of dietary

- intake of acrylamide in humans. *Toxics*, 9(7), 155. <https://doi.org/10.3390/toxics9070155>.
- UNION EUROPEA (2017). *Reglamento (UE) 2017/ 2158 de la comisión de 20 de noviembre de 2017 por el que se establecen medidas de mitigación y niveles de referencia para reducir la presencia de acrilamida en los alimentos*.
- Urbańska, B., & Kowalska, J. (2021). Analysis of 5-hydroxymethylfurfural (HMF) content in conched chocolate milk masses and selected raw materials used for their production. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, (1), 42-49.
- Witkowska, A.M., Zujko, M.E., Waśkiewicz, A., Terlikowska, K.M., & Piotrowski, W. (2015). Comparison of various databases for estimation of dietary polyphenol intake in the population of polish adults. *Nutrients*, 7(11), 9299-9308. <https://doi.org/10.3390/nu7115464>.
- Yaylayan, V. A. (2006). Precursors, formation and determination of furan in food. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit*, 1(1), 5-9. <https://doi.org/10.1007/s00003-006-0003-8>.
- Ye, C., Xiao, X., Sui, H., Yang, D., Yong, L., & Song, Y. (2023). Trends of caffeine intake from food and beverage among Chinese adults: 2004-2018. *Food and Chemical Toxicology*, 173, 113629. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113629>.

Capítulo 3

Validación de técnicas analíticas para la cuantificación de NFCs en cacao y café tostado: garantizando precisión y fiabilidad

Validation of analytical techniques for the quantification of NFCs in cocoa and roasted coffee: ensuring precision and reliability

Resumen

La formación de compuestos neoformados (NFCs) durante el tostado de café y cacao, como la acrilamida, el furano, el hidroximetilfurfural y alcohol furfurílico, representa un desafío analítico y sanitario, ya que influyen simultáneamente en las propiedades sensoriales y en el perfil toxicológico del alimento. La evaluación de la exposición depende no solo de su detección, sino de la confiabilidad metrológica de los métodos empleados. Este capítulo describe y valida metodologías basadas en técnicas de extracción selectiva combinadas con cromatografía líquida y gaseosa, acopladas a la detección por UV y a la espectrometría de masas, seleccionadas según las propiedades fisicoquímicas de los analitos y la complejidad de la matriz. Se evaluaron la idoneidad del sistema, la selectividad, la linealidad, los límites de detección y cuantificación, la exactitud, la precisión y la reproducibilidad interlaboratorio. Los métodos mostraron alta linealidad ($R^2 \geq 0,99$), recuperaciones entre el 80 y el 120%, precisión con %RSD $< 16\%$ para la acrilamida y $< 5\%$ para FFA/HMF, y valores de HorRat de entre 0,3 y 1,3, lo que confirma la reproducibilidad. La aplicación rigurosa de la validación indica un desempeño robusto y adecuado para su propósito analítico, lo que

favorece la comparabilidad interlaboratorio y la toma de decisiones basadas en datos confiables para el control de calidad y la evaluación de riesgos. No obstante, la confiabilidad sigue dependiendo de la matriz y es susceptible a sesgos de extracción, interferencias o efectos de ionización que pueden distorsionar la estimación del riesgo.

Palabras clave: *cromatografía, compuestos neoformados, validación de métodos analíticos, seguridad alimentaria, matrices alimentarias.*

Abstract

The formation of neoformed compounds (NFCs) during coffee and cocoa roasting, such as acrylamide, furan, hydroxymethylfurfural, and furfuryl alcohol, poses both analytical and public health challenges, as these compounds simultaneously affect sensory attributes and the toxicological profile of foods. Exposure assessment depends not only on their detection but also on the metrological reliability of the analytical methods employed. This chapter describes and validates analytical methodologies based on selective extraction techniques, combined with liquid and gas chromatography, and coupled with UV and mass spectrometric detection. The methods were selected according to the physicochemical properties of the target analytes and the complexity of the food matrix. System suitability, selectivity, linearity, limits of detection and quantification, accuracy, precision, and interlaboratory reproducibility were systematically evaluated. The validated methods exhibited high linearity ($R^2 \geq 0.99$), recoveries ranging from 80 to 120%, precision with %RSD < 16% for acrylamide and < 5% for FFA and HMF, and HorRat values between 0.3 and 1.3, confirming their reproducible performance. Overall, the rigorous validation demonstrates robust analytical performance and fitness for purpose, supporting interlaboratory comparability and evidence-based decision-making in quality control and risk assessment. Nevertheless, analytical reliability remains matrix-dependent and susceptible to extraction bias, matrix interferences, and ionization effects, potentially compromising the accuracy of exposure and risk estimates.

Keywords: *Chromatography, Neoformed compounds, Analytical method validation, Food safety, Food matrices.*

Introducción

En el capítulo anterior, se abordó la formación de compuestos neoformados (NFCs) durante el proceso de tostado del cacao y café, destacando las principales reacciones químicas involucradas, su impacto en la calidad del producto y la seguridad alimentaria. Comprender la generación de estos compuestos es fundamental para evaluar los efectos del tostado y su influencia en las

propiedades toxicológicas de estos alimentos. Sin embargo, para garantizar un análisis preciso y reproducible de los NFCs, es imprescindible contar con técnicas analíticas adecuadas y validadas. En este capítulo, se presentan los principios y procedimientos clave en la validación de métodos analíticos para la cuantificación de NFCs en cacao y café tostado, asegurando la fiabilidad de los resultados y su aplicación en estudios de control de calidad y evaluación de riesgos.

Estos compuestos se pueden evaluar a través de diferentes tecnologías y principios teóricos desarrollados por diferentes agencias reguladoras como la EFSA y la FDA. Uno de los métodos más implementados para la determinación de la acrilamida es el desarrollado por la agencia del Gobierno de los Estados Unidos de América responsable de la regulación de alimentos y medicamentos (FDA), que desarrolló métodos de cuantificación de acrilamida y furano optimizando la proporción de señal/ruido de los análisis (FDA, 2006, 2003). Otros analitos como 5-HMF, alcohol furfurílico, asparagina, glucosa, fructosa y sacarosa han sido estudiados mediante métodos de cromatografía líquida de alta eficacia (Albouchi & Murkovic, 2019; Bertuzzi *et al.*, 2017).

Validar o verificar las metodologías de extracción de los analitos es fundamental, ya que garantiza que el método cumpla con los parámetros de rendimiento requeridos, como exactitud, linealidad, precisión, repetibilidad, reproducibilidad e incertidumbre, en la matriz seleccionada (ISO/IEC, 2005). La extracción no solo aísla y concentra los analitos de la matriz, sino que también elimina posibles interferencias que podrían afectar los análisis posteriores. Para ello, se emplean disolventes orgánicos como metanol, etanol o acetonitrilo, y en algunos casos, se añaden modificadores como ácido fórmico, ácido acético o agua para mejorar la eficiencia del proceso. En este sentido, existen diversas técnicas de extracción, tanto convencionales como avanzadas, que optimizan la transferencia de masa y aceleran el proceso. Tras la extracción y la cuantificación de los NFCs, es recomendable validar la incertidumbre del método mediante la evaluación de parámetros de rendimiento como la precisión intermedia y la repetibilidad, expresadas como desviación estándar relativa (%RSD), que idealmente debe ser menor del 15% para garantizar una adecuada precisión de los resultados. Asimismo, se debe evaluar la recuperación del método, que debe situarse entre el 80% y el 110% para ser considerada adecuada (AOAC International, 2016).

La implementación de estos parámetros es esencial para garantizar la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados analíticos, permitiendo una adecuada cuantificación de los NFCs en cacao y café tostado. Para ello, es fundamental

seguir los lineamientos establecidos por organismos reguladores y normativos, como la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA), el Consejo Internacional para la Armonización de Requisitos Técnicos para el Registro de Productos Farmacéuticos de Uso Humano (ICH) y la Asociación de Comunidades Analíticas (AOAC). Estas entidades proporcionan criterios estandarizados para la validación de métodos analíticos, asegurando que las técnicas empleadas cumplan con estándares de precisión, exactitud, sensibilidad y robustez. La correcta aplicación de estos lineamientos no solo fortalece la calidad de los estudios analíticos, sino que también facilita la comparabilidad de los resultados en diferentes laboratorios y contribuye a la toma de decisiones basada en datos confiables, tanto en el ámbito académico como en el industrial.

En este capítulo, se abordarán los parámetros de validación, incluyendo exactitud, precisión, linealidad, límites de detección y cuantificación, entre otros, los cuales son útiles para garantizar la fiabilidad de los métodos empleados. Posteriormente, se explorarán las técnicas analíticas utilizadas, haciendo énfasis en los procesos de extracción, la influencia de las propiedades químicas de los analitos en la selección del método y las estrategias para minimizar interferencias. Finalmente, se presentará un caso de estudio aplicado a la determinación de acrilamida, hidroximetilfurfural (HMF) y alcohol furfurílico (FFA) en muestras de café y cacao tostado, ilustrando la aplicación de los conceptos y su importancia en el análisis de estos compuestos en matrices alimentarias.

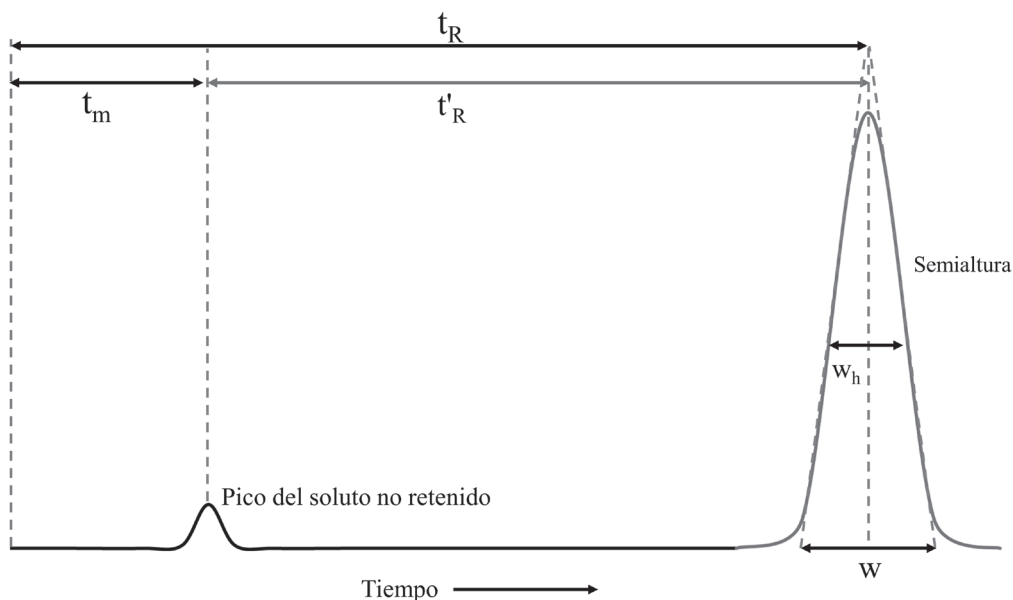
Parámetros de validación

Para garantizar la confiabilidad de los métodos analíticos empleados en la cuantificación de NFCs en muestras tostadas de café y cacao, es fundamental evaluar su desempeño mediante parámetros de validación estandarizados. En este sentido, se han adoptado los criterios propuestos por la FDA, basados en la guía ICH Q2 (R1), los cuales establecen los requisitos necesarios para la cuantificación de impurezas en matrices complejas. Estos incluyen la idoneidad del sistema, la selectividad, la linealidad del sistema y del método, el límite de cuantificación (LOQ), el límite de detección (LOD), la precisión, precisión intermedia, la repetibilidad y el rango (FDA, 2005). La aplicación rigurosa de estos parámetros permite no solo demostrar la exactitud y reproducibilidad de los resultados, sino también asegurar que el método empleado sea robusto y adecuado para su propósito analítico.

- 1. *Idoneidad del sistema (System suitability test):*** la idoneidad del sistema es un conjunto de pruebas que permiten evaluar el rendimiento del sistema

analítico antes de su aplicación en el análisis de muestras. Su objetivo es garantizar que el equipo, los reactivos y el método empleado funcionen de manera adecuada y reproducible bajo las condiciones establecidas. Para ello, se analizan parámetros como la resolución, el factor de capacidad, la eficiencia de la columna y la repetibilidad de las inyecciones. En este sentido, la idoneidad o aptitud del sistema se puede definir en dos términos: i) el factor de asimetría y ii) la resolución del pico. La determinación de estos componentes garantiza que la detección electrónica y el método de separación presenta una varianza significativa en la cuantificación de los analitos. La Figura 1 ilustra el cálculo del factor de asimetría (T), un parámetro crítico en la evaluación de la idoneidad del sistema cromatográfico. Este factor se obtiene a partir de la relación entre el ancho del pico medido al 5% de su altura máxima ($W_{0,05}$) y la distancia desde el 5% de la altura del pico hasta la posición de la altura máxima (f) (ICH, 2005). Este parámetro proporciona una medida cuantitativa de la simetría del pico cromatográfico, donde un valor de T cercano a 1 indica una forma de pico ideal y simétrica. Valores superiores a 1 sugieren cola en el pico (tailing), mientras que valores menores a 1 reflejan frente del pico (fronting). La evaluación del factor de asimetría es esencial para garantizar una adecuada separación de los analitos y evitar problemas como el solapamiento de picos o la pérdida de resolución, lo que podría comprometer la exactitud y precisión del análisis.

Figura 1. Factor de asimetría (Pápai & Pap, 2002)



Por otro lado, la resolución del pico refleja la capacidad de la columna para separar eficientemente los analitos en una mezcla compleja. La resolución (R_s) depende principalmente de la diferencia en los tiempos de retención de los analitos y del ancho de los picos en la línea de base, factores que están influenciados por la eficiencia de la columna, la selectividad del sistema y las condiciones cromatográficas utilizadas. Un mayor número de platos teóricos (N) indica una mejor eficiencia de la columna y una menor dispersión del pico cromatográfico, lo que puede favorecer la resolución y mejorar la precisión en la cuantificación de los analitos. Sin embargo, para garantizar una separación adecuada, también es necesario optimizar otros parámetros, como la fase móvil, la velocidad de flujo y la selectividad de la columna. El cálculo de N puede realizarse a partir de diferentes aproximaciones matemáticas, dependiendo del criterio de medición del ancho del pico. Si el ancho se mide a la mitad de la altura máxima del pico ($W_{h/2}$), se emplea la ecuación 2.1. En cambio, si el ancho del pico se mide en la línea de base (W), se utiliza la ecuación 2.2.

$$N = 5,54 \left(\frac{t_R}{W_{h/2}} \right)^2 \quad [Ec. 2.1]$$

$$N = 16 \left(\frac{t_R}{W} \right)^2 \quad [Ec. 2.2]$$

2. **Selectividad:** la selectividad indica el nivel de distinción de un analito sin la interferencia de otros componentes que puedan presentar respuestas similares en una matriz. Se define como la relación entre los factores de retención de los analitos y está influenciada por la composición de la fase móvil, el tipo de fase estacionaria y las interacciones químicas entre los compuestos y la columna cromatográfica. Para verificar la selectividad de cada metodología, se deben realizar inyecciones sucesivas de cada solución estándar preparada. De esta manera, se conoce la RSD entre los tiempos de retención y las áreas obtenidas por el sistema cromatográfico (ICH, 2005). En este caso, la RSD de los tiempos de retención y de las áreas de los picos puede utilizarse como un criterio para verificar la estabilidad y repetibilidad del sistema, asegurando que el analito sea detectado de manera constante, sin variaciones significativas. Además, se recomienda comparar los cromatogramas obtenidos con una muestra en blanco (sin analito) y con una muestra real fortificada para confirmar que no existen interferencias significativas que afecten la cuantificación del compuesto de interés.

- 3. Linealidad:** la linealidad mide la capacidad del método para proporcionar resultados directamente proporcionales a la concentración del analito en un rango determinado. En otras palabras, indica qué tan bien la señal obtenida (respuesta instrumental) sigue una relación lineal con la concentración del analito en la muestra, por lo que se considera como la capacidad de describir la respuesta instrumental en un modelo lineal, en función de la concentración del analito en un rango de trabajo definido (Ecuación 2.3).

$$y = \alpha + \beta x + \epsilon \quad [Ec. 2.3]$$

Donde α es el intercepto, β la pendiente y ϵ el error, que se pueden modelar mediante una distribución normal, con media igual a 0 y sin diferencias entre las varianzas. Pruebas como la carencia de ajuste o la prueba de Mandel permiten afirmar si el modelo obtenido es adecuado para la calibración, la cual puede ser construida con al menos cinco concentraciones en un intervalo de trabajo definido, por triplicado. Dependiendo de la matriz analizada con la cual se determina el modelo lineal, este adopta el nombre de linealidad del sistema en el caso de las soluciones estándar, o del método, cuando se evalúa la linealidad enriqueciendo la muestra con el estándar o cambiando la proporción de extracto solvente para cubrir el comportamiento del analito en un intervalo de concentración (ICH, 2005).

Por otro lado, la linealidad del sistema se refiere a la relación matemática entre la respuesta instrumental y la concentración del estándar en un sistema ideal, compuesto únicamente por solventes. Su objetivo es verificar que la dispersión o los sesgos en las mediciones de las soluciones estándar sean aceptables dentro de un nivel de confianza del 95%, conforme a las recomendaciones de la FDA. Este parámetro se evalúa utilizando al menos cinco niveles de concentración dentro del intervalo de trabajo definido, a partir de tres preparaciones independientes, cada una analizada mediante una única inyección.

Por su parte, la linealidad del método evalúa la capacidad del procedimiento analítico para generar una relación proporcional y consistente entre la concentración del analito en la matriz de la muestra y la respuesta obtenida por el equipo. Este parámetro garantiza que los datos experimentales puedan ser modelados de manera adecuada para el propósito del análisis, asegurando que cualquier desviación en la respuesta se deba a la composición de la muestra y no a factores externos. Para comprobar su validez, se verifica que la

relación entre la concentración del analito y la señal analítica pueda ajustarse a un modelo lineal dentro de un nivel de confianza del 95%, permitiendo así su correcta aplicación en la cuantificación de los analitos en muestras reales.

La diferencia fundamental entre la linealidad del sistema y la linealidad del método radica en el contexto de su evaluación. La linealidad del sistema se determina utilizando soluciones estándar en solventes, verificando que el equipo analítico responda de manera proporcional a la concentración del analito en condiciones ideales, sin interferencias de la matriz. En cambio, la linealidad del método evalúa la respuesta analítica en muestras reales, incluyendo todas las etapas del procedimiento (extracción, preparación y cuantificación), lo que permite identificar posibles efectos de la matriz sobre la medición. Mientras que la linealidad del sistema confirma el desempeño instrumental, la linealidad del método garantiza que el análisis es válido y confiable en condiciones reales de trabajo.

4. **Límite de cuantificación (LOQ):** El límite de cuantificación (LOQ, por sus siglas en inglés, Limit of Quantification) es el menor concentración de un analito en una muestra que puede determinarse con precisión y exactitud aceptables mediante un método analítico validado. Representa el umbral a partir del cual es posible realizar determinaciones cuantitativas confiables del analito, lo que lo diferencia del límite de detección (LOD), el cual únicamente permite establecer la presencia del analito, sin garantizar una cuantificación precisa.

El LOQ puede estimarse como la relación entre la intensidad de señal (IS) y el ruido (R) (Ec.2.4), omo la relación entre diez veces la desviación estándar relativa (RSD) del intercepto de la curva de calibración y la pendiente (m) de la misma (Ec.2.5) (ICH, 2005), o mediante el producto de la desviación estándar de la concentración de muestras blanco (S_{blancos}) por un factor de 10 (Ec. 2.6).

$$LOQ = \frac{IS}{R} \quad [Ec. 2.4]$$

$$LOQ = \frac{10 * RSD}{m} \quad [Ec. 2.5]$$

$$LOQ = 10 * S_{\text{blancos}} \quad [Ec. 2.6]$$

5. **Límite de detección (LOD):** El límite de detección (LOD, por sus siglas en inglés, Limit of Detection), es la concentración más pequeña del analito, detectable

por un instrumento, con la certeza de que la señal obtenida depende del analito y no del ruido, pero no necesariamente cuantificada con precisión y exactitud dentro de un método analítico. En otras palabras, representa el nivel más bajo en el que la presencia del analito puede diferenciarse del ruido de fondo del sistema analítico, pero sin la certeza suficiente para determinar su concentración exacta.

El LOD puede calcularse como tres veces S_{blancos} (Ec.2.6) o también se puede estimar como la razón de tres veces RSD del intercepto de la curva de calibrado y la pendiente (m) de la misma (Ec.10) (ICH, 2005).

$$LOD = 3 * S_{\text{blancos}} [Ec. 2.6]$$

$$LOD = \frac{3 * RSD}{m} [Ec. 2.7]$$

6. **Exactitud:** hace referencia al grado de cercanía entre la concentración real y el valor medido del analito; esta prueba se evalúa en términos de recuperación entre dos réplicas de tres niveles de concentración, generalmente fortificando y/o diluyendo la muestra (ICH, 2005). La exactitud se expresa en términos de porcentaje de recuperación (%), comparando la cantidad de analito determinada con la cantidad teórica o agregada en la muestra.
7. **Precisión:** se define como el grado de dispersión entre mediciones consecutivas de una muestra homogénea bajo condiciones analíticas definidas. Existen tres niveles de precisión a considerar: repetibilidad, precisión intermedia y reproducibilidad (ICH, 2005).

La repetibilidad evalúa la precisión del método cuando se aplica en las mismas condiciones operativas, en el mismo laboratorio, por el mismo analista, con el mismo equipo y en un corto período de tiempo. Por otra parte, la precisión intermedia se considera como el grado de repetibilidad en los resultados al variar condiciones del ensayo, distintos analistas, equipos, días, pero dentro del mismo laboratorio.

Por último, la reproducibilidad se interpreta como la capacidad de ser reproducido bajo las mismas condiciones cromatográficas por diferentes laboratorios (ICH, 2005). Esta se puede estimar mediante el valor de HorRat definido como la razón entre la RSDri/PRSDr, donde RSDri es la desviación

Tabla 1. Descripción de los niveles de precisión

Nivel	Condiciones	Objetivo
Repetibilidad (Intra-ensayo)	Mismo día, mismo analista, mismo equipo	Consistencia dentro de un solo experimento
Precisión intermedia (Intra-laboratorio)	Días distintos, diferentes analistas o equipos	Evaluar robustez del método en un mismo laboratorio
Reproducibilidad (Inter-laboratorio)	Diferentes laboratorios, analistas y equipos	Validar aplicabilidad global del método

estándar relativa para los análisis realizados en diferentes días y PRSDr la desviación estándar relativa prevista, establecida por la ecuación de Horwitz. El HorRat es ideal para evaluar reproducibilidad inter-laboratorio, ya que permite comparar la variabilidad observada con la esperada para un determinado nivel de concentración. En general el HorRat se puede interpretar como:

- **$0,5 \leq \text{HorRat} \leq 2,0$:** aceptable (variabilidad dentro de los límites esperados).
- **$\text{HorRat} < 0,5$:** demasiado preciso (puede indicar subestimación de incertidumbre).
- **$\text{HorRat} > 2,0$:** reproducibilidad inaceptable (excesiva variabilidad inter-laboratorio).

8. Rango: intervalo de concentraciones en el que cada analito es detectable de manera precisa, repetible y exacta. Los límites de la curva de calibrado usualmente se consideran como el rango de aplicación del método cromatográfico (ICH, 2005). Este rango establece los límites dentro de los cuales el método puede aplicarse de manera válida sin perder desempeño analítico.

Técnicas cromatográficas para la determinación de NFCs

Durante la última década se han desarrollado y optimizado diversas metodologías para la determinación y cuantificación de compuestos neoformados (NFCs), siendo las técnicas cromatográficas las más ampliamente implementadas debido a su alta sensibilidad y capacidad de separación. Dentro de estas, la cromatografía líquida (LC) y la cromatografía de gases (GC) se han consolidado como los métodos de referencia para la cuantificación de NFCs en matrices alimentarias, siendo recomendados por entidades regulatorias como la FDA y la EFSA para garantizar la seguridad y el control de calidad en los alimentos procesados (FDA, 2020, 2005).

La eficacia de estas técnicas radica en el principio de separación diferencial de los analitos con base en su afinidad por la fase estacionaria y la fase móvil. En la cromatografía líquida (LC), la fase móvil es un líquido, mientras que en la cromatografía de gases (GC), la fase móvil es un gas inerte, lo que hace que cada técnica sea más adecuada para distintos tipos de compuestos. La retención de los NFCs en la columna cromatográfica se define por su interacción con la fase estacionaria, la cual puede ser sólida, líquida o en forma de geles. Esta interacción determina el tiempo de retención, un parámetro clave en la identificación y cuantificación de los compuestos en la muestra analizada.

No obstante, la eficacia en la separación y detección de NFCs no depende únicamente de la técnica cromatográfica empleada, sino también de las propiedades químicas de los analitos, las cuales influyen en su comportamiento durante el procesos de extracción, retención y detección. Factores como la polaridad, solubilidad, peso molecular, estabilidad térmica y volatilidad juegan un papel determinante en la selección del método analítico más adecuado. Por esta razón, es fundamental comprender las propiedades fisicoquímicas de los NFCs para optimizar las condiciones experimentales y mejorar la sensibilidad y selectividad de los métodos de análisis.

1. Propiedades químicas de los NFCs

Acrilamida: compuesto con baja masa molar (71,08 g/mol), elevado punto de ebullición (241°C) y alta polaridad (43,1 Å²) (Schouten *et al.*, 2021). El punto de ebullición de 241°C indica que la acrilamida es un compuesto relativamente poco volátil, lo que la hace más adecuada para análisis mediante cromatografía líquida (HPLC) en lugar de cromatografía de gases (GC), ya que no se volatiliza fácilmente sin derivatización previa. En GC, sería necesario utilizar agentes derivatizantes para hacerla más volátil y compatible con la fase gaseosa.

Por otro lado, este compuesto presenta un grupo amida, capaz de donar y recibir hidrógeno; también es muy soluble en agua y fácilmente soluble en compuestos orgánicos como metanol, etanol, acetona y acetato de etilo (National Center for Biotechnology Information, 2022a). Su grupo amida (-CONH₂) le permite tanto donar como aceptar puentes de hidrógeno, facilitando su solubilización en disolventes polares y acuosos.

Para su determinación cromatográfica es necesario el uso de una fase móvil acuosa ligeramente acidificada con un ácido débil; por ejemplo, ácido fórmico

o ácido acético, lo que modifica el pH del medio y permite la obtención de un mejor perfil cromatográfico, debido a la desprotonación del agua, facilitando la transferencia de hidrógenos.

Además, se puede emplear columnas C18 de fase reversa como UPLCTM BEH, que son híbridas entre sílice y puentes de etileno, lo que les confiere mayor estabilidad y reproducibilidad. También, se puede usar columnas de cromatografía de interacción hidrofílica (HILIC) que permiten una mayor retención del analito en comparación de las columnas C18 debido a interacciones hidrofílicas favorecidas por el coeficiente de partición cuando la fase estacionaria es menos polar (agua o mezclas acuosas) en relación con la fase estacionaria.

Furano: es un compuesto inflamable y con bajo punto de ebullición (31°C), tiene una masa molar de 68,07 g/mol, con capacidad de aceptar hidrógenos, su superficie polar es inferior a 15 Å².

El punto de ebullición extremadamente bajo del furano lo convierte en un compuesto ideal para el análisis por cromatografía de gases (GC). Su baja polaridad indica que es crucial el diseño de métodos de extracción y pretratamiento de muestras, ya que la elección del solvente afecta la eficiencia de recuperación del analito.

Se considera que el furano es muy soluble en etanol y éter, soluble en acetona, benceno y ligeramente soluble en cloroformo. Por estas características se utiliza un alcohol de cadena corta como solvente de extracción; por ejemplo, el metanol (National Center for Biotechnology Information, 2022b).

La fase estacionaria, puede estar diseñada para aplicaciones de compuestos polares y apolares específicos; por ejemplo, poliestireno divinilbenceno, que por afinidad retiene compuestos altamente apolares, permitiendo el paso del furano a través de la columna con moderada retención.

Alcohol furfurílico (FFA) e hidroximetilfurfural (HMF): Son compuestos heterocíclicos, con masas molares similares de 98,10 y 126,11 g/mol, respectivamente. A pesar de sus diferencias estructurales, estos compuestos comparten características importantes, como su solubilidad en agua, la capacidad de formar enlaces de hidrógeno y una superficie polar que varía entre 33,4 y 70,7 Å², lo que influye en su interacción con disolventes y fases cromatográficas (National Center for Biotechnology Information, 2022c-d).

Además, tienen la capacidad de formar enlaces de hidrógeno tanto como donantes (grupo -OH en FFA), - como aceptores (oxígeno del anillo furánico y grupos carbonilos en HMF). Esta propiedad es clave en la selección de disolventes y en la interacción con la fase estacionaria en métodos cromatográficos.

Para la determinación conjunta de estos compuestos en cromatografía líquida, se suele utilizar en los primeros minutos del método agua levemente acidulada como fase móvil. Al bajar el nivel del pH del agua se aumentan los iones hidrógeno disponibles como resultado de su desprotonación.

Luego se debe incrementar en gradiente la concentración del solvente menos polar (metanol), para obtener una mejor separación de los compuestos de acuerdo con su capacidad para formar enlaces con moléculas no polares, dada la similitud entre sus propiedades. La columna recomendada para la separación de los compuestos aromáticos es la columna C8 debido a que el octadecilsilano retiene menor cantidad de compuestos hidrófobos, durante un tiempo inferior a columnas como la C18, reteniendo moderadamente el compuesto y reduciendo el tiempo del análisis.

2. Métodos de extracción de NFCs

Los métodos de extracción son una etapa clave en el análisis de compuestos neoformados (NFCs) en alimentos, ya que permiten la separación selectiva de los analitos de interés minimizando la interferencia de la matriz. Estos métodos buscan separar los analitos de interés del alimento con la mayor selectividad, minimizando los efectos de la matriz (Ghorbani *et al.*, 2019). Los solventes comúnmente empleados en las técnicas de extracción son el etanol, el acetonitrilo como solventes orgánicos y el ácido fórmico, el ácido acético y el agua como solvente inorgánico. Estos se emplean en técnicas de extracción convencionales y modernas como la extracción asistida por ultrasonidos (EAU), la extracción asistida por microondas (MAE), la extracción líquido-líquido (LLE), la microextracción en fase líquida (LPME), la microextracción de gota única (SDME), la microextracción en fase líquida con fibra hueca (HF-LPME), microextracción líquido-líquido dispersiva (DLLME), la extracción asistida por enzimas (EAE), la extracción en fase sólida dispersiva (DSPE) como extracción en fase sólida magnética (MSPE) o la extracción en fase microsólida (μ SPE) y los campos eléctricos aceleran el proceso o mejoran la transferencia de masa al disolvente (Aguas *et al.*, 2006; Gökmen and Şenyuva, 2006; Keramat *et al.*, 2011; van Lancker *et al.*, 2009; Wenzl *et al.*, 2007).

En el caso de la acrilamida se ha implementado la extracción en fase sólida (SPE), la LLE y la extracción en fase sólida dispersiva (dSPE) (Arisseto *et al.*, 2008). La extracción en fase sólida (SPE) es un método comúnmente empleado que utiliza una fase estacionaria para capturar componentes de la matriz en un medio líquido, seguido de la elución con un disolvente (Zeng *et al.*, 2020). Esta técnica se aplica con frecuencia para extraer acrilamida (AA) de productos a base de cacao y bebidas de café (Acquaticci *et al.*, 2023; Gil *et al.*, 2020; Recknagel *et al.*, 2020). En SPE, el agua ha demostrado una eficacia superior para la extracción de AA en comparación con disolventes orgánicos como metanol, acetonitrilo, acetato de etilo y sus mezclas (Aguas *et al.*, 2006; Corrêa *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2023; Şenyuva & Gökmen, 2005; Żyzelewicz *et al.*, 2017). Esto se debe probablemente a la capacidad del agua para manejar compuestos polares y no polares, favoreciendo las interacciones hidrofílicas e hidrofóbicas y facilitando la eliminación de sustancias no deseadas. Se han investigado diversos materiales comerciales para SPE, como el gel de sílice (SiOH) y los copolímeros equilibrados hidrofílicos-lipofílicos (HLB) (Şenyuva y Gökmen, 2005). Los cartuchos que contienen estos rellenos han producido una recuperación consistente del analito objetivo en un solo paso de extracción (Delatour *et al.*, 2004). Sin embargo, un enfoque de extracción en dos pasos que combina SPE-HLB con técnicas multimodales (catiónicas y aniónicas) junto con la extracción líquido-líquido (LLE) ha mostrado valores de recuperación mejorados (Arisseto *et al.*, 2008).

Esta mejora puede atribuirse a la capacidad de la LLE para separar compuestos lipídicos, precipitar proteínas y sustancias de alto peso molecular mediante la exposición de la muestra líquida a un disolvente. La combinación de LLE y SPE para la extracción de AA de matrices de cacao y café logra la eliminación selectiva de interferencias debido a la afinidad de los compuestos no polares de la matriz con el absorbente y del AA con el extractante, lo que resulta en una mejor resolución de los picos (Delatour *et al.*, 2004). Por ejemplo, puede utilizarse acetato de etilo para extraer analitos. Tras la evaporación del reactivo, el extracto se hace pasar por cartuchos multimodo (C18 no polar e intercambiador de iones de fase mixta), seguido de la precipitación de interferencias (proteínas y compuestos de alto peso molecular) mediante la adición de soluciones Carrez I y Carrez II (Arisseto *et al.*, 2008; Delatour *et al.*, 2004). Posteriormente, se emplea centrifugación o agitación para acelerar la precipitación de compuestos no deseados.

Una alternativa a la extracción en fase sólida (SPE) convencional es la extracción en fase sólida dispersiva (dSPE). Este método consiste en distribuir

el sorbente por toda la matriz de la muestra, lo que mejora la cinética de sorción y la eficacia general del proceso. En el caso de las muestras de cacao y café, este enfoque se ha empleado con éxito para eliminar contaminantes, normalmente utilizando QuEChERS (Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged, and Safe), junto con sales (NaCl y MgSO₄) y sorbentes (cartuchos C18) (Ofosu *et al.*, 2019). Cabe destacar que, cuando se aplican en la técnica QuEChERS, materiales novedosos como las nanopartículas de Fe₃O₄ han demostrado recuperaciones de acrilamida (AA) en el café que oscilan entre el 81% y el 101% (Bertuzzi *et al.*, 2020; Xian *et al.*, 2019).

La cromatografía de gases (CG) suele emplearse para el análisis del furano, a menudo utilizando patrones de isótopos deuterados-4. Este método produce un factor de respuesta que se correlaciona con la concentración de la mezcla isotópica, que puede expresarse mediante una ecuación lineal o exponencial. Este enfoque permite la cuantificación del analito de la muestra y la evaluación de los efectos de la matriz (Zoller *et al.*, 2007). Las agencias reguladoras como la FDA recomiendan el uso de la técnica de espacio de cabeza (Headspace, HS). Este método consiste en alcanzar el equilibrio vapor-muestra en un recipiente sellado bajo temperatura y agitación controladas, seguido de la presurización del vial y la toma de muestras (Zoller *et al.*, 2007). Para las matrices de cacao y café, se han implementado modificaciones a esta técnica, principalmente ajustando los parámetros de agitación, la duración de la incubación y la temperatura. Estos ajustes influyen en el equilibrio del vial y en la formación de furano debido a los compuestos precursores (azúcares y aminoácidos) en la composición química de la muestra. Por ejemplo, reducir la temperatura de incubación de 60 °C a 50 °C conduce a una menor formación de furano (Hasnip *et al.*, 2006). Mientras que la HS ofrece simplicidad y eficiencia de tiempo en comparación con la HS-SPME, esta última proporciona una mayor selectividad al retener el analito mediante adsorción/absorción y minimizar la formación de nuevos compuestos de furano durante la desorción cerca de 30 °C (EFSA, 2011; Altaki *et al.*, 2011; Cao P. *et al.*, 2022). Además de la agitación, el tiempo de incubación y la temperatura en HS-SPME, el grosor y el material de la fibra SPME también desempeñan un papel en el proceso. La recuperación de furano se ha evaluado utilizando varias fibras SPME comerciales: polidimetilsiloxano (PDMS, 100 µm), carboxeno/polidimetilsiloxano (CAR/PDMS, 75 µm), poliacrilato (PA, 85 µm), polidimetilsiloxano/divinilbenceno (PDMS/DVB, 65 µm), carbowax/divinilbenceno (CW/DVB, 65 µm) y un Stable-Flex de divinilbenceno/carboxeno/polidimetilsiloxano (DVB/CAR/PDMS, 50/30 µm) (Altaki *et al.*, 2007). CAR/PDMS demostró una retención superior de furano

debido a su afinidad por moléculas polares y no polares a través de fuerzas de Van der Waals. Además, las fibras de 75 μm de grosor son más eficaces para compuestos de punto de ebullición más bajo como el furano, ofreciendo una selectividad mejorada en comparación con las fibras más gruesas (Genovese *et al.*, 2021).

La extracción líquido-líquido (LLE) es el método principal para obtener FA y HMF. La elección del disolvente de extracción influye en la concentración final del compuesto. Por ejemplo, utilizando metanol como disolvente se obtienen mayores porcentajes de recuperación de FA y HMF en comparación con mezclas de agua y metanol o agua pura, aunque esta diferencia no es sustancial (Albouchi & Murkovic, 2019). Además, se han empleado interacciones dipolo-dipolo y fuerzas de dispersión de London para extraer FA y HMF utilizando disolventes de polaridad media a alta, como el diclorometano. Estos pueden sustituirse por disolventes más polares como el acetato de etilo, la acetona, el acetonitrilo y el metanol. Sin embargo, estos disolventes alternativos pueden introducir complicaciones al extraer compuestos adicionales que podrían contaminar el extracto. Para eliminar las interferencias en los extractos de muestras de café y cacao, un enfoque común consiste en combinar la adición de sal con la filtración o centrifugación, lo que ayuda a la precipitación de las proteínas. Además, diferentes tipos de fibras, como la SPME, pueden acoplarse a la cromatografía de gases para aislar los AF. En muestras de café espresso, se han utilizado fibras como PDMS (100 μm), PA (85 μm) y CAR/PDMS (75 μm) (Petisca *et al.*, 2013). Las fibras CAR/PDMS han demostrado una mayor intensidad de la señal de FA debido a que las cargas no apareadas de los electrones fomentan los enlaces a través de las interacciones de Van der Waals y dipolo-dipolo durante la extracción (Petisca *et al.*, 2013).

Por último, en los procesos de extracción dirigidos a determinaciones con espectroscopia de masas, la limpieza o clarificación es importante debido a la diferencia entre la concentración de NFC, que suelen ser cantidades traza, y las concentraciones de proteínas, fibras y aceites. La sensibilidad del equipo determina la concentración mínima detectable del analito en el extracto, lo que requiere la preparación de extractos con una alta concentración del analito objetivo. Una limpieza adecuada es vital en este paso para evitar que los coextractos afecten a la vida útil de la columna debido a la saturación. Las altas concentraciones de compuestos interferentes pueden limitar la sensibilidad del método hasta el punto de contaminar los analizadores de

masas, lo que conduce a una ionización incompleta causada por la coelución de compuestos (Long *et al.*, 2023).

3. Cuantificación por cromatografía líquida

La técnica de cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas (LC-MS) se emplea frecuentemente para el análisis de acrilamida en café y cacao, debido a la presencia de este analito en concentraciones que oscilan entre 2 mg/L y 2 µg/L (Downard, 2004). Esta técnica es esencial para alcanzar mayor selectividad y sensibilidad en moléculas que se encuentran en trazas ya que los patrones de fragmentación expresados en términos de las relaciones masa-carga generadas por una fuente eléctrica o térmica son específicos de cada compuesto y, dependiendo de la resolución de los detectores, permiten obtener una mayor confianza en los resultados (Xian *et al.*, 2019). Adicionalmente, la eficiencia de la ionización del analito objetivo puede verse reducida en determinados alimentos por la presencia de moléculas que compiten por la superficie de ionización, lo que afecta la precisión de los resultados y también se denomina efecto matriz (Volmer & Jessome, 2006). Una alternativa para mitigar o reducir el efecto ha sido el uso de isótopos como la acrilamida deuterada 3 (AA-d3), que posee una relación masa-carga de $m/z = 75 > 58$ y propiedades similares a las de la acrilamida. De este modo, las respuestas instrumentales obtenidas pueden corregirse mediante el cociente entre la concentración de acrilamida y la del isótopo, comparando la concentración enriquecida del isótopo con la concentración estimada de acrilamida (Aguas *et al.*, 2006).

La ionización por electrospray y la ionización química a presión atmosférica, son versátiles y pueden ser adaptadas en un amplio rango de pesos moleculares y alta polaridad (Aguas *et al.*, 2006; Pardo *et al.*, 2007; Zhu & Chang, 2008). Especialmente, cuando la acrilamida es evaluada por cromatografía líquida es convencional el uso de modificadores orgánicos como ácido acético, ácido fórmico y ácido gálico, empleados principalmente en la fase móvil debido a que favorecen la ionización del analito en detectores tipo MS (Mesías & Morales, 2014; Zhu *et al.*, 2019).

Con respecto al análisis del alcohol furfurílico en el cacao y el café se ha llevado a cabo comúnmente mediante detectores ultravioleta a longitudes de onda cercanas a 217 nm debido a que corresponde a su máxima absorbancia. Su determinación se ha basado en cromatografía de fase reversa con el uso de columnas afines a moléculas polares o medianamente polares

compuestas por octadecil silano (C8) o octadecilo silano (C18). La longitud de la cadena carbonada establece la afinidad por un rango de compuestos hidrofílicos, teniendo mayor cobertura de compuestos cuando esta es mayor. Adicionalmente, las columnas C8 al retener menos compuestos pueden obtener una mayor resolución en menor tiempo de corrida (Albouchi & Murkovic 2019).

El HMF, por otra parte también se ha analizado mediante cromatografía líquida dado que su estructura molecular es estable, por lo tanto, requiere de más energía para favorecer su cambio de fase líquida a gaseosa, por consiguiente se han establecido metodologías cromatográficas líquidas, principalmente asociadas a detectores de arreglo de diodos, basadas en el principio de absorbancia hallando su máximo en longitudes cercanas a 284 nm, utilizando columnas de fase reversa (Quarta y Anese 2012; Czerwonka, Opiłka, y Tokarz 2018; Arribas-Lorenzo y Morales 2010; Akillioglu y Gökmen 2014; Cortes-Macías *et al.*, 2022). En esas condiciones el analito es más afín a las fases móviles orgánicas como acetonitrilo, metanol o mezclas con mayor proporción orgánica. (Rahn & Yeretizian, 2019; Shi *et al.*, 2019).

También, el HMF puede requerir de corrección de la concentración mediante adición de patrón o patrón interno, usualmente se emplea el isótopo hydroxymethylfurfural (HFM-d6) debido al efecto que puede ocasionar la matriz durante el proceso de extracción.

En este caso, la muestra suele analizarse en un espectrómetro MS/MS rastreando las transiciones de masa de carga m/z - 1 127 y 133, para los iones precursores del HMF y el isótopo estable (HFM -d6), además de la relación de masa de carga de los iones fragmentados 53 y 81 para el HMF y 86 para el HFM-d6 (Sun *et al.*, 2022). Otra alternativa en la determinación MS/MS es la derivatización del HMF con dinitrofenilhidrazina (DNPH), que consigue la cuantificación del derivado HMF-DNPH, fácilmente separable mediante columnas capilares selectivas de ácido polimetacrílico-co-etileno, para la cuantificación de concentraciones extremadamente pequeñas, mostrando LOD de hasta 3,4 $\mu\text{g kg}^{-1}$ (Huang *et al.*, 2019; Wu *et al.*, 2009).

4. Cuantificación por cromatografía gaseosa

En el caso del furano y el alcohol furfurílico se pueden evaluar través de técnicas de cromatografía gaseosa asociada a espectrometría de masas, asociados a tipos de analizadores como: un cuadrupolo, triple cuadrupolo

con algunas variaciones dependiendo el analito, ya que estos ofrecen una amplia sensibilidad en la cuantificación.

El furano se encuentra presente en varios alimentos, por ser un compuesto volátil su análisis se basa en la cuantificación en este estado. Las preparaciones de la muestra contemplan el espacio de cabeza (HS) y la microextracción en fase sólida en el espacio de cabeza (HS-SPME) aunque para el café se prefieren el método HS debido a sus altos niveles de concentración, ya que el SPME puede adsorber selectivamente los compuestos en la fibra y saturarla; por lo tanto, puede no ser adecuado para este compuesto. Sin embargo, para el alcohol furfurílico, puede ser la mejor alternativa de extracción al seleccionar fibras de polidimetilsiloxano/divinilbenceno/ Carboxeno (PDMS/DVB/CAR) (Cao *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2023).

Por otra parte, existen metodologías para cuantificar la acrilamida de forma indirecta mediante procesos de derivatización debido a que la estructura de la molécula es termoestable y medianamente polar. Por esta razón, es común inducir la reacción entre la acrilamida y bromuro de trimetilamonio, bromuro de benciltrimetilamonio o bromuro de metilbencilo, para obtener compuestos que requieren menor energía para su volatilización (Wawrzyniak & Jasiewicz, 2019).

Durante la preparación de las muestras es indispensable el uso de cloruro de sodio, disminuyendo el punto de ebullición del compuesto, favoreciendo el cambio de fase líquida a gaseosa de los derivados de la acrilamida y del alcohol furfurílico. Luego, de la obtención del extracto esta es llevada a cromatografía gaseosa acoplados a analizadores de masas.

En particular, en el caso del café algunos investigadores han indicado la necesidad de marcar con isótopos como la acrilamida deuterada 3, el hidroximetilfufural deuterado 4 en las muestras para realizar la corrección de la concentración como por adición de estándar. Esta alternativa es más precisa; por lo tanto, puede aplicarse a cualquier metodología sobre todo en aquellas en las que la extracción representa una disminución considerable del analito.

Caso de estudio para la determinación de acrilamida, HMF y FFA en café y cacao tostado

El presente caso de estudio tiene como objetivo establecer una metodología analítica validada para la detección y cuantificación de NFCs en muestras de café y cacao tostado, utilizando técnicas cromatográficas avanzadas. Para ello,

se emplearán estrategias de extracción eficientes que minimicen la interferencia de la matriz y permitan una recuperación óptima de los analitos. Además, se discutirán los factores que afectan la formación de estos compuestos, así como la importancia de su monitoreo en la evaluación de riesgos asociados al consumo de productos tostados.

1. **Extracción y determinación de acrilamida:** el extracto para la determinación de acrilamida se preparó utilizando una relación de 100 mg/mL en una mezcla de agua tipo I y diclorometano, con la adición de acrilamida deuterada como estándar interno. La inclusión de este estándar facilita la normalización de la respuesta instrumental, ya que permite establecer la relación entre las señales de la acrilamida y su isótopo. Esto no solo mejora la precisión del método, sino que también corrige posibles pérdidas del analito durante el procedimiento de extracción, optimizando la exactitud de la cuantificación.

El empleo de diclorometano permitió retirar impurezas no polares o con mediana polaridad como lípidos y alcaloides presentes en el café y el cacao. Seguidamente, se favoreció el cambio de fase acuosa a la orgánica con una mezcla de acetonitrilo y cloruro de sodio, debido a que la sal en agua se disocia en iones catiónicos (Na^{+1}) y aniónicos (Cl^{-1}), interactuando mediante sus cargas electrostáticas, disminuyendo y/o limitando las interacciones de hidrógeno entre los compuestos polares al mezclarlo con el extracto acuoso, favoreciendo la separación de las fases, desplazando al analito a la fase orgánica. Posteriormente, el extracto se clarificó con sulfato de magnesio, que por su higroscopicidad absorbe el agua, teniendo un efecto desecante en el extracto. Luego, el sobrenadante se dispensó en el Kit de QuEChERS AOAC 2007 compuesto por 1.200 g MgSO_4 y 400 mg PSA (Thermo Scientific, EE. UU). Finalmente, se filtraron con nylon 0,2 μm y se transfirió a viales.

El análisis fue realizado en un cromatógrafo líquido de ultra eficiencia (UPLC, por sus siglas en inglés) serie H-Class. La columna empleada fue la ACQUITY UPLC HSS T3, 100 Å, 1,8 μm , 2,1 mm x 100 mm (Waters Corporation, EE. UU), utilizando un volumen de inyección de 3 μL . La fase móvil estuvo compuesta por una mezcla de ácido fórmico al 0,1% en agua (A) y acetonitrilo con ácido fórmico al 0,1% (B).

La composición varió desde un 90% inicial de A, a los 1,5 minutos, disminuyó al 50% hasta los 1,8 minutos. Posteriormente, se mantuvo constante durante 0,3 minutos, seguido de un aumento gradual del porcentaje de B hasta el

95% a los 2,5 minutos, para luego disminuir al 50% hasta los 2,8 minutos. Finalmente, disminuyó al 10% a los 3,2 minutos y se mantuvo constante hasta los 7 minutos.

El voltaje de capilar y cono fue de 0,5 KV y 50 V. El modo de ionización fue ESI +, la temperatura de la fuente 150°C, temperatura de desolvatación 500°C y el flujo del gas de desolvatación 1000 L/h (Medina-Orjuela *et al.*, 2024).

- 2. Extracción y determinación de alcohol furfurílico e hidroximetilfurfural:** Los extractos para la determinación de alcohol furfurílico e hidroximetilfurfural se obtuvieron mediante una extracción líquido-sólido empleando agua tipo I como solvente ya que ambos analitos tienen la capacidad de disolverse en este medio. La relación del soluto y el solvente fue de 20.000 mg/L y 40.000 mg/L, para el café y el cacao, respectivamente. A continuación, fueron eliminados algunos compuestos de alto peso molecular, como proteínas y grasas, mediante el complejo formado por las sales Carrez I (hexacianoferrato (II) de potasio trihidratado) y Carrez II (hexacianoferrato (II) de potasio trihidratado) (Albouchi & Murkovic, 2019). Estas sales solubilizaron los compuestos de cadenas largas para precipitarlos, retirando impurezas que pudieran interferir con la resolución de los picos analíticos y el tiempo de corrida del método. Posteriormente, el extracto fue filtrado con jeringas de nailon de 0,2 µm y transferido a viales para su análisis, con lo cual permitió el paso de partículas hidrofílicas inferiores a 0,2 µm, evitando el taponamiento o sedimentación de partículas mayores que puedan deteriorar la columna cromatográfica (Albouchi & Murkovic, 2019). El análisis se realizó en un cromatógrafo de alto rendimiento (HPLC) serie 1200 (Agilent Technologies, EE. UU), empleando una columna C8 Nucleosil, 120 Å, 4,6 µm, 3,5 mm x 150 mm (Macherey-Nagel, Alemania), debido a que proporcionó la separación de los dos NFCs con una buena retención por encima del tiempo muerto de la columna y un tiempo inferior a otras composiciones como la C18 (Medina-Orjuela *et al.*, 2024).
- 3. Protocolo de validación, resultados y discusión:** Los métodos analíticos ofrecen una confianza en los resultados en cuanto a que su rendimiento sea adecuado a los requerimientos legales (recomendaciones de ingesta diaria y contenido del producto) Esto se obtiene al demostrar precisión, exactitud y reproducibilidad en los resultados, lo que permite comparar resultados entre laboratorios y servir de referencia para establecer o identificar si su concentración es promedio y mediante estudios de ingesta, estimar si

representan una exposición a contaminantes de proceso; en este caso, a la acrilamida y al alcohol furfurílico mediante su ingesta. En este sentido, en la siguiente sección se abordará la evaluación de dos métodos mediante los parámetros explicados en la sección 2, previo a su aplicación.

Aptitud del sistema

La evaluación de este parámetro se realizó mediante una solución independiente en un nivel de concentración y cinco inyecciones consecutivas de los estándares (Figura 2). Se aceptó el criterio cuando la desviación estándar relativa fue menor que 2,0%, lo que indica que el sistema cromatográfico puede conllevar una variación de 2% RSD con respecto a la media, la cual puede originarse por acondicionamiento de la columna o una limpieza eficiente, un extracto homogéneo y un buen funcionamiento de las partes cromatográficas (AOAC International, 2016), siendo ideal cuando adopta valores cercanos a 0 (Figura 3 y 4).

Por otra parte, el factor de asimetría se encontró entre 0,8 y 1,3 en la solución estándar con una eficiencia de más de 10000 platos teóricos, garantizando que la simetría del pico disminuya el error de una inadecuada integración debido a la coelución de analitos, picos partidos o poco resueltos, visibles como hombros, colas o frentes por la columna cromatográfica (Tabla 2) (FDA, 2020).

El análisis de acrilamida mediante UPLC-MS/MS mostró una alta eficiencia de separación, con un número de platos teóricos (N) de 120.830, indicando una excelente capacidad de la columna para reducir la dispersión del pico cromatográfico. En contraste, los valores de N para el FFA (12.468) y el HMF

Figura 2. Cromatograma del estándar de acrilamida a $250 \mu\text{g Kg}^{-1}$ y una muestra de café tostado. Transiciones de mayor abundancia de acrilamida 72,862>55,893 y de acrilamida d3 75,1>58,1. Tiempos de retención 1,55 y 1,54, respectivamente

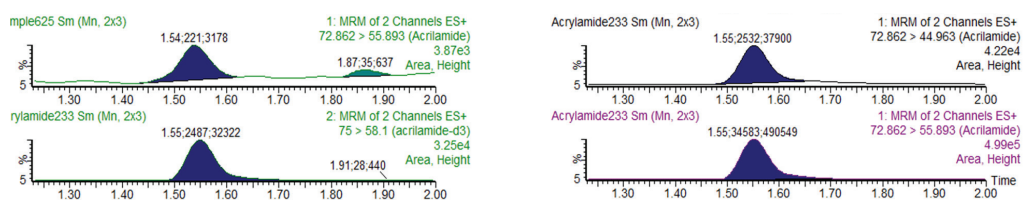
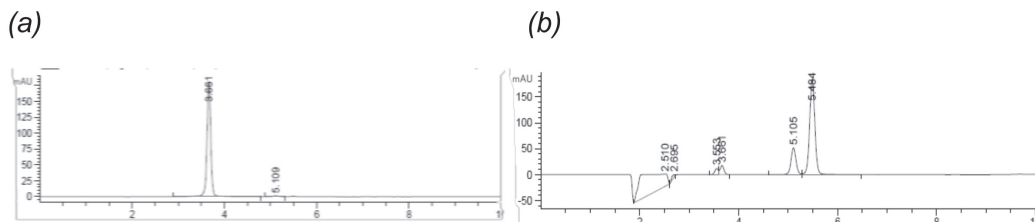


Figura 3. Cromatograma del estándar mixto de 10 mg Kg⁻¹ FFA y HMF a 284 nm y 217 nm



(10.584), analizados por HPLC-DAD, son significativamente menores, lo que es esperable dado que UPLC ofrece una mayor resolución y eficiencia en comparación con HPLC debido a su menor tamaño de partícula en la fase estacionaria (Tabla 2). El factor de asimetría es un parámetro clave para evaluar la calidad de los picos cromatográficos. La acrilamida presentó un valor de 1,30, lo que indica una ligera cola en el pico, posiblemente debido a interacciones con la fase estacionaria o efectos de ionización en el espectrómetro de masas. En contraste, los valores de FFA y HMF (1,02 para ambos) muestran picos más simétricos, favoreciendo una cuantificación más precisa en HPLC-DAD, que utiliza detección por absorbancia y suele ser menos sensible a efectos de cola en comparación con UPLC-MS/MS.

Selectividad

La condición se analizó a través de siete inyecciones de cada preparación de solución estándar y tres inyecciones de la muestra, ambas en un nivel de concentración similar que facilitó su comparación visual. El parámetro es aceptable cuando los picos y tiempos de retención de los estándares de

Tabla 2. Aptitud del sistema cromatográfico evaluada mediante los platos teóricos, factor de asimetría, tiempo de retención y reproducibilidad del sistema

Parámetro	Acrilamida	FFA	HMF
Platos teóricos (N)	120830	12468	10584
Factor de asimetría	1,30	1,02	1,02
Tiempo de retención (min)	1,55	4,99	3,66
Reproducibilidad del sistema (%RSD)	0,02%	0,03%	0,47%

cada analito y de las muestras eran similares ($\pm 10\%$), reflejando selectividad al coincidir en tiempos (Tabla 2). Al no haber desplazamiento indicó que la fuerza iónica inducida entre la fase móvil y el extracto permitió separar correctamente los analitos y que no había retención o analitos residuales en la columna que ocasionaran picos “basura” por una deficiente limpieza de la columna. Adicionalmente, los picos no presentaron hombros, frente o cola que impidieran la identificación y cuantificación del analito, con una fácil distinción del ruido de la línea base garantizando picos resueltos (AOAC International, 2016).

Linealidad, límite de cuantificación (LOQ) y Límite de detección (LOD)

La linealidad del sistema se evaluó en el rango de concentraciones de 4,9-399,0 $\mu\text{g/kg}$ de acrilamida y de 10,0-30,0 mg/kg para HMF y FFA, en café y cacao tostado. Según la ICH Q2 (R1) son suficientes cinco niveles para modelar la respuesta de un sistema. Sin embargo, la cantidad de puntos dependió del resultado de la prueba de falta de ajuste, en ausencia de datos suficientes para ajustar el modelo, se estableció como máximo siete concentraciones intermedias para predecir el comportamiento de los datos. Cada concentración se preparó por triplicado e inyectó al sistema. Para aceptar este criterio se determinó la linealidad mediante el coeficiente de determinación (R^2) la cual fue $\geq 0,99$ (Tabla 3) (FDA, 2020). Esto indicó que la respuesta instrumental presento correlación positiva con la concentración de los estándares y que el ajuste lineal encontrado representaba una fuerte correlación con los datos experimentales, describiendo fielmente el comportamiento de la concentración en el rango evaluado (figuras 4, 5 y 6).

La evaluación de la gráfica de residuos de la regresión lineal es una herramienta clave para validar la calidad del modelo de calibración empleado

Tabla 3. *Parámetros de rendimiento del método para la cuantificación de acrilamida, HMF y FFA en cacao y café.: linealidad, el LOD y el LOQ*

Parámetro	Acrilamida	FFA	HMF
	0,03-1,33		
Linealidad	(abundancia AA/abundancia AA-3)	10-30 mg/kg	10-30 mg/kg
R^2	0,9978	1,0000	0,9998
β	4,04*	107,38* $\text{kg mg}^{-1}\mu\text{A}^{-1}$	129,01*($\text{Kg mg}^{-1}\mu\text{A}^{-1}$)
A	0,03 ^{n.s.}	16,27 ^{n.s.} (μA)	-6,68 ^{n.s.} (μA)
LOD	2,6 $\mu\text{g/kg}$	0,081 mg/L	0,249 mg/L
LOQ	8,8 $\mu\text{g/kg}$	0,272 mg/L	0,832 mg/L

en la cuantificación de acrilamida, HMF y FFA. La gráfica mostró un patrón aleatorio en torno a cero, lo que sugiere la ausencia de tendencias sistemáticas o errores estructurados en la respuesta instrumental. Este comportamiento indica que el modelo de regresión lineal se ajusta adecuadamente a los datos experimentales y que los residuos siguen una distribución homogénea, lo que refuerza la validez del modelo. Si los residuos hubieran mostrado una tendencia ascendente o descendente, esto sugeriría un ajuste inadecuado o la necesidad de un modelo de regresión no lineal.

Por otro lado, el análisis de varianza (ANOVA) aplicado al modelo de regresión permitió evaluar la significancia estadística de la pendiente y del intercepto. El estadístico F obtenido fue superior al valor tabulado para un nivel de confianza del 95%, lo que confirma que la pendiente de la ecuación de calibración es estadísticamente significativa (Tabla 3). Esto implica que la respuesta instrumental presenta una correlación directa con la concentración del analito, lo que valida la capacidad del modelo para predecir con precisión los valores de concentración en muestras desconocidas. En contraste, el intercepto del modelo fue no significativo, es decir, su valor fue despreciable o cercano a cero. Este resultado es deseable en estudios de calibración, ya que un intercepto significativo podría indicar una señal de fondo, interferencias en la matriz o problemas en la instrumentación que afectarían la precisión en concentraciones bajas. La ausencia de un intercepto significativo refuerza que la señal obtenida es atribuible únicamente a la presencia del analito y no a factores externos.

Figura 4. Ajuste lineal de acrilamida mediante estándar interno

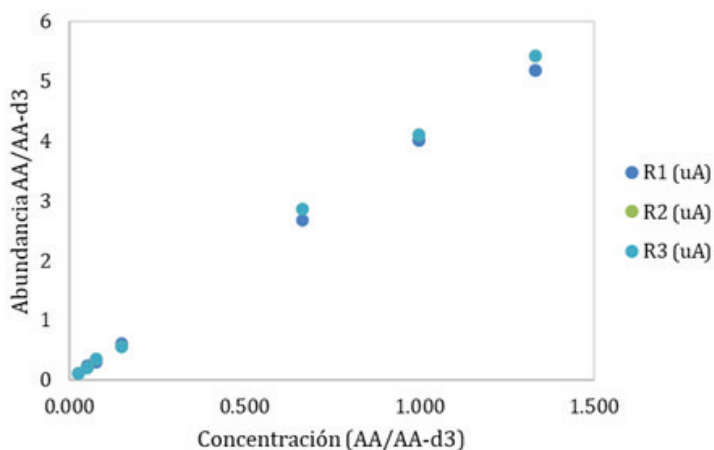


Figura 5. Ajuste lineal de Alcohol furfurílico mediante estándar externo

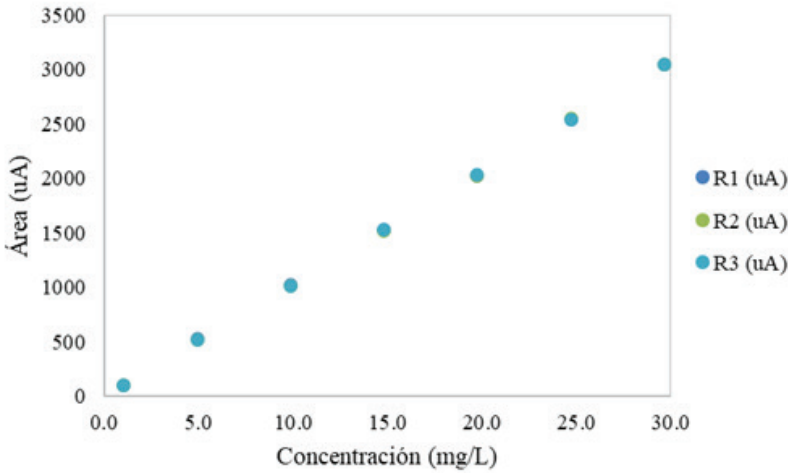
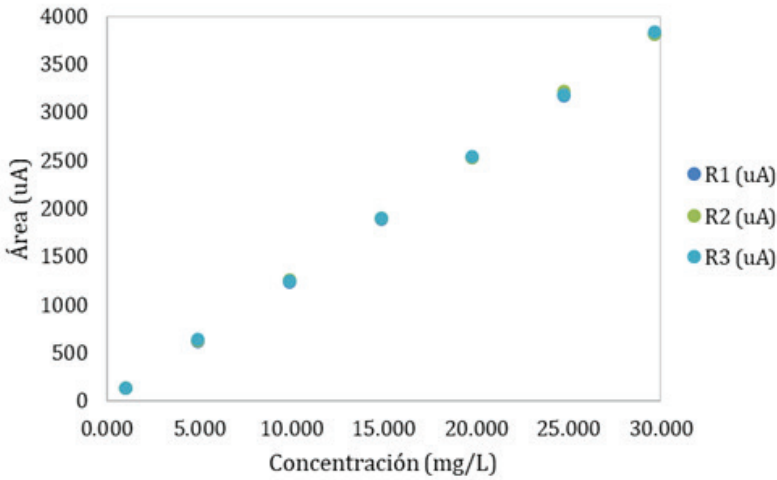


Figura 6. Ajuste lineal de hidroximetilfurfural mediante estándar externo



Los resultados indicaron que el LOQ fue menor al 50% de la concentración de cada analito en las muestras analizadas (tabla 3), lo que confirma que el método es lo suficientemente sensible para cuantificar los NFCs en niveles bajos sin comprometer la exactitud y la precisión de los resultados. La aceptabilidad del LOQ en este rango es un criterio importante, ya que asegura que el método puede detectar y cuantificar incluso pequeñas cantidades de acrilamida, HMF y FFA en muestras reales. Un LOQ elevado en relación con la

concentración del analito en la muestra podría comprometer la aplicabilidad del método en estudios de seguridad alimentaria, ya que indicaría que el analito solo es cuantificable a niveles muy altos, limitando su uso en muestras con bajos niveles de NFCs. En este caso, el LOQ obtenido cumple con los estándares de aceptabilidad, garantizando que el método es adecuado para la cuantificación en muestras reales de café y cacao tostado. De manera similar, el LOD se estimó a partir de las mismas variables que el parámetro LOQ (Ec 2.7). Los resultados mostraron que los LOD fueron inferiores a las concentraciones de cada analito objetivo en las muestras analizadas (Tabla 3), lo que indica que el método puede detectar estos compuestos en niveles muy bajos, lo que constituye un criterio clave para estudios de seguridad alimentaria y evaluación de riesgos (AOAC International, 2016).

Exactitud

Se prepararon tres soluciones independientes para cada nivel a las concentraciones correspondientes a 12, 18 y 32 µg/kg de acrilamida en café, y 10, 40, 120 µg/kg en cacao tostado, y de 1, 5 y 10 mg/kg FFA y HMF en café y cacao tostado. Posteriormente, se realizaron dos lecturas por muestra. El porcentaje de recuperación es un indicativo de la exactitud del método, se calcula mediante la relación entre: la concentración encontrada de cada analito en la muestra y la concentración teórica preparada (Eq 2.8). Adicionalmente, se calculó el promedio respectivo por nivel de concentración y el porcentaje de desviación estándar relativa en cada nivel. Siendo C_I la concentración analítica instrumental y C_T la concentración teórica.

$$\%Recuperación = \frac{C_I}{C_T} [Ec. 2.8]$$

El criterio de aceptación empleado para este parámetro fue el porcentaje medio de recuperación, evaluado en cada nivel encontrándose entre 80 % y 120% (AOAC International, 2016). Esto sugiere que la concentración del analito no influye en la recuperación de los analitos y que no hay pérdida significativa del analito mediante la preparación del extracto, demostrando una buena exactitud. En café, la recuperación de acrilamida varió entre 87,46% y 111,46%, lo que indica una alta exactitud, aunque con valores superiores al 110% en algunos casos (Tabla 4), lo que podría sugerir una sobreestimación en ciertas concentraciones, posiblemente debido a efectos de matriz o a una mayor sensibilidad del sistema en bajas concentraciones. Tanto en café como en cacao, los valores de recuperación de FFA oscilaron

entre 80,9% y 101,8%, lo que indica una exactitud adecuada, sin desviaciones significativas ni sobreestimaciones. En café y cacao, la recuperación de HMF varió entre 86,4% y 100,8%, dentro del rango aceptable y con valores cercanos a 100%, lo que indica alta exactitud del método.

Tabla 4. Niveles de precisión de los métodos para la cuantificación de acrilamida, FFA y HMf en café y cacao tostados en términos de recuperación, precisión y reproducibilidad

Alimento	Analito	Recuperación (%)	Precisión (%RSD)	Precisión intermedia (%RSD)	HorRat
Café	AA	87,46-111,46	8,26	13,51	0,84
	FFA	80,9-101,8	1,97	2,93	0,98
	HMF	86,4-100,8	1,09	6,16	0,36
Cacao	AA	86,9-90,7	8,91	15,8	0,98
	FFA	80,9-101,8	2,73	15,73	1,97
	HMF	91,7-100,9	2,85	13,43	2,00

Precisión, precisión intermedia y reproducibilidad

La precisión del método se evaluó a partir de 12 muestras de café y cacao tostado analizadas por el mismo analista en un mismo día. La precisión es un parámetro fundamental en la validación de métodos analíticos, ya que mide la variabilidad de los resultados bajo condiciones repetidas. Se expresa mediante la desviación estándar relativa (%RSD) y evalúa qué tan reproducibles son los datos dentro del mismo día (repetibilidad). El %RSD de los resultados de precisión en cada nivel fue inferior o igual al 5,0% para FFA y HMF y al 16% para la acrilamida (Tabla 4). Para la acrilamida en ambas matrices, la precisión se encuentra cerca del 8-9%, dentro del umbral aceptable (<10%), aunque con mayor variabilidad en cacao (8,91%) en comparación con café (8,26%). La variabilidad observada puede estar relacionada con la complejidad de la matriz y las posibles interacciones de la acrilamida con otros componentes del café y el cacao. Dado que la acrilamida es un compuesto muy polar y soluble en agua, su recuperación y cuantificación pueden verse influenciadas por factores como la eficiencia de extracción y la estabilidad en el sistema cromatográfico.

La precisión para HMF y FFA en café y cacao es excelente, con valores inferiores al 3%, lo que indica una alta estabilidad del método analítico. Los valores de %RSD en cacao son ligeramente mayores que en café, lo que sugiere una mayor variabilidad en la extracción o cuantificación en esta matriz

(Tabla 4). La menor variabilidad en café sugiere una mejor repetibilidad del método en esta matriz, posiblemente debido a una mejor interacción entre el HMF y el FFA con la fase móvil y la columna cromatográfica.

En la precisión intermedia se realizó de forma similar al parámetro anterior, más la introducción de la incertidumbre que puede aportar al resultado si este se evalúa por otro analista y en diferentes días (interdiaria). Con esto se logró evaluar la influencia de las condiciones ambientales, instrumental y error humano. Para garantizar esto, cada analista se encargó de preparar cada extracto y cada curva de calibración. Se analizaron 6 muestras de café y cacao por cada analista y por día.

Después se evaluó el %RSD, siendo considerado aceptable cuando se encontraba por debajo del 10%. También, estas muestras fueron analizadas por duplicado/día, aceptando este criterio cuando el %RSD no excedía el 16%. Como se evidencia en la Tabla 4, la variabilidad que podían inducir el componente humano, los equipos e instrumentos de medición y las condiciones atmosféricas fue inferior a la considerada aceptable, confirmando su aplicabilidad en ambas matrices (FDA, 2020). Sin embargo, en cacao se encontró mayor variabilidad, por ejemplo, para la acrilamida en estas muestras la precisión intermedia de 15,8% sugiere una mayor variabilidad entre repeticiones en días distintos o entre analistas. Esta mayor variabilidad en cacao podría deberse a efectos de la matriz, que podrían influir en la eficiencia de extracción o en la estabilidad del analito durante el análisis. Sin embargo, a pesar de la variabilidad observada, los valores siguen dentro de los criterios de aceptación, lo que sugiere que el método es aplicable para la cuantificación de acrilamida, FFA y HMF en café y cacao tostado, con la necesidad de ajustes menores en cacao para mejorar su reproducibilidad.

Finalmente, a partir de la precisión del método analítico se estimó la reproducibilidad en condiciones Interlaboratorio con la ecuación de HorRat definida anteriormente, donde el PRSD_{ri}, representa la desviación estándar relativa teórica esperada para la reproducibilidad de un método analítico en función de la concentración del analito. Este parámetro se basa en la ecuación empírica de Horwitz, que establece que la variabilidad de un método analítico aumenta a medida que la concentración del analito disminuye. Matemáticamente, se calcula como:

$$PRSD_{ri} = 2^{(1-0,5 \log C)} \times 100 \text{ Ec 2.7}$$

Donde **C** es la concentración del analito expresada como fracción (ejemplo: para 1 ppm, $C = 10^{-6}$; para 1 ppb, $C = 10^{-9}$). En este caso $PRSD_{ri}$ es igual a los valores de 16 y 45% equivalentes a concentración del analito en el orden de magnitud de 1ppm y 1 ppb, respectivamente. Al calcular el valor HorRat para café y para cacao se halló que estaba entre 0,3 y 1,3, indicando que los dos métodos son potencialmente reproducibles entre laboratorios (AOAC, 2016). Sin embargo, en el caso del valor de 0,3, debería considerarse una reevaluación de la variabilidad real del sistema para verificar que no se esté subestimando el error en los datos experimentales.

Referencias

- Acquaticci, L., Angeloni, S., Cela, N., Galgano, F., Vittori, S., Caprioli, G., & Condelli, N. (2023). Impact of coffee species, post-harvesting treatments and roasting conditions on coffee quality and safety related compounds. *Food Control*, 149, 109714. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109714>
- Aguas, P. C., Fitzhenry, M. J., Giannikopoulos, G., & Varelis, P. (2006). Analysis of acrylamide in coffee and cocoa by isotope dilution liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Anal Bioanal Chem* 385, 1526-1531. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0560-9>
- Akillioglu, H. G., & Gökmen, V. (2014). Mitigation of acrylamide and hydroxymethylfurfural in instant coffee by yeast fermentation. *Food Research International*, 61, 252-256. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.07.057>
- Albouchi, A., & Murkovic, M. (2019). LC method for the direct and simultaneous determination of four major furan derivatives in coffee grounds and brews. *J. Sep. Sci.*, 42, 1695-1701. <https://doi.org/10.1002/JSSC.201900061>
- Altaki, M.S., Santos, F. J., & Galceran, M. T. (2007). Analysis of furan in foods by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-ion trap mass spectrometry. *J. Chromatogr. A*, 1146(1), 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.01.104>
- Altaki, M. S., Santos, F. J., & Galceran, M. T. (2011). Occurrence of furan in coffee from Spanish market: contribution of brewing and roasting. *Food Chemistry* 126(4), 1527-1532. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.11.134>
- AOAC International. (2016). Appendix F: Guidelines for standard method performance requirements. In G. W. Latimer, Jr. (Ed.), *Official methods of analysis of AOAC International*.
- Arisseto, A. P., de Figueiredo-Toledo, M. C., Govaert, Y., van Loco, J., Fraselle, S., & Degroot, J.M. (2008). A modified sample preparation for acrylamide determination in cocoa and coffee products. *Food Analytical Methods*, 1(1), 49-55. <https://doi.org/10.1007/s12161-007-9001-4>
- Arribas-Lorenzo, G., & Morales, F. J. (2010). Estimation of dietary intake of 5-hydroxymethylfurfural and related substances from coffee to Spanish population. *Food Chemical Toxicology*, 48(2), 644-649. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.11.046>.
- Bertuzzi, T., Rastelli, S., Mulazzi, A., & Pietri, A. (2017). Survey on acrylamide in roasted coffee and barley and in potato crisps sold in Italy by a LC-MS/MS method. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 10(4), 292-299. <https://doi.org/10.1080/19393210.2017.1351498>
- Cao, P., Zhang, L., Yang, Y., Wang, X., Liu, Z., Li, J., Wang, L., Chung, S., Zhou, M., Deng, K., Zhou, P., & Wu, P. (2022). Analysis of furan and its major furan

- derivatives in coffee products on the Chinese market using HS-GC-MS and the estimated exposure of the Chinese population. *Food Chemistry*, 387, 132823. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132823>
- Corrêa, C.L.O., das Mercedes-Penha, E., Dos-Anjos, M.R., Pacheco, S., Freitas-Silva, O., Luna, A.S., & Gottschalk, L.M.F. (2021). Use of asparaginase for acrylamide mitigation in coffee and its influence on the content of caffeine, chlorogenic acid, and caffeic acid. *Food Chemistry*, 338, 128045. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128045>
- Cortés-Macías, E.T., López, C. F., Gentile, P., Girón-Hernández, J., & López, A. F. (2022). Impact of post-harvest treatments on physicochemical and sensory characteristics of coffee beans in Huila, Colombia. *Postharvest Biology Technology*, 187, 111852. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2022.111852>
- Czerwonka, M., Opiłka, J., & Tokarz, A. (2018). Evaluation of 5-hydroxymethylfurfural content in non-alcoholic drinks. *European Food Research and Technology*, 244, 11-18. <https://doi.org/10.1007/s00217-017-2933-z>
- Delatour, T., Périsset, A., Goldmann, T., Riediker, S., & Stadler, R. H. (2004). Improved sample preparation to determine acrylamide in difficult matrices such as chocolate powder, cocoa, and coffee by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(15), 4625-4631. <https://doi.org/10.1021/jf0498362>.
- Downard, K. (2004). *Mass spectrometry: A foundation course*. Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781847551306>.
- European Food Safety Authority. (2011). Update on furan levels in food from monitoring years 2004-2010 and exposure assessment. *EFSA Journal*, 9(9), 2347. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2011.2347>.
- FDA.(2003). *Detection and quantitation of acrylamide in foods*. <https://www.fda.gov/food/chemical-contaminants-food/detection-and-quantitation-acrylamide-foods>.
- FDA. (2005). Q2(R1) *Validation of analytical procedures: text and methodology guidance for industry*. <https://database.ich.org/sites/default/files/Q2%28R1%29%20Guideline.pdf>
- FDA. (2006). *Determination of furan in foods*. <https://www.fda.gov/food/chemical-contaminants-food/determination-furan-foods>.
- FDA. (2020). Food and drug administration office of regulatory affairs ORA laboratory manual volume II methods, method verification and validation sections in this document.
- Genovese, A., De Vivo, A., Aprea, A., Tricarico, M. C., Sacchi, R., & Sarghini, F. (2021). Particle size and variety of coffee used as variables in mitigation of furan and 2- methylfuran content in espresso coffee. *Food Chemistry*, 361, <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130037>.

- Ghorbani, M., Aghamohammadhassan, M., Chamsaz, M., Akhlaghi, H., & Pedramrad, T. (2019). Dispersive solid phase microextraction. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 118, 793-809. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2019.07.012>.
- Gil, M., Ruiz, P., Quijano, J., Londono-Londono, J., Jaramillo, Y., Gallego, V., Tessier, F., & Notario, R. (2020). Effect of temperature on the formation of acrylamide in cocoa beans during drying treatment: an experimental and computational study. *Heliyon*, 6(2), e03312. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03312>.
- Gökmen, V., & Şenyuva, H. Z. (2006). Improved method for the determination of hydroxymethylfurfural in baby foods using liquid chromatography-mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 2845-2849. <https://doi.org/10.1021/jf053091y>.
- Hasnip, S., Crews, C., & Castle, L. (2006). Some factors affecting the formation of furan in heated foods. *Food Additives & Contaminants*, 23(3), 219-227. <https://doi.org/10.1080/02652030500539766>.
- Huang, Y., Li, C., Hu, H., Wang, Y., Shen, M., Nie, S., Chen, J., Zeng, M., & Xie, M. (2019). Simultaneous determination of acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural in heat-processed foods employing enhanced matrix removal-lipid as a new dispersive solid-phase extraction sorbent followed by liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(17), 5017-5025. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05703>.
- International Council for Harmonisation Expert Working Group. (2005). ICH harmonised tripartite guideline: Q2(R1) *validation of analytical procedures: text and methodology*. International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Registration of Pharmaceuticals for Human Use. <https://database.ich.org/sites/default/files/Q2%28R1%29%20Guideline.pdf>
- International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission. (2005). NTC-ISO/IEC 17025: *Norma técnica colombiana*.
- Keramat, J., LeBail, A., Prost, C., & Soltanizadeh, N. (2011). Acrylamide in foods: chemistry and analysis. A review. *Food and Bioprocess Technology*, 4, 340-363. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0470-x>.
- Long, Y., Huang, Y., Zhu, M., Ma, Y., Gan, B., Wang, Y., Yu, Q., Xie, J., & Chen, Y. (2023). Development of QuEChERS clean-up based on EMR-lipid for simultaneous analysis of 9 mycotoxins, acrylamide and 5-Hydroxymethylfurfural in biscuit by UHPLC-MS/MS. *Food Chem.* 409, 135265. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135265>.
- Medina-Orjuela, M. E., Barrios-Rodríguez, Y. F., Carranza-Gutiérrez, C. E., Girón-Hernández, J., & Amorocho-Cruz, C.M. (2024). In-house validation of analytical methods for the determination of NFCs in roasted coffee and

- cocoa. In: *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*. Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2024.1.1.1711>
- Mesias, M., & Morales, F. J. (2016). Acrylamide in bakery products. In: *Acrylamide in Food: Analysis, Content and Potential Health Effects*, 1, 131-157.
- National Center for Biotechnology Information. (2022a). *Acrylamide*. In *Report on Carcinogens* (NCBI Bookshelf). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK590860/>
- National Center for Biotechnology Information. (2022b). *PubChem compound summary for CID 7843*, furan. U.S. National Library of Medicine. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Furan>
- National Center for Biotechnology Information. (2022c). *PubChem compound summary for CID 237332*, 5-hydroxymethylfurfural. U.S. National Library of Medicine. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/237332>
- National Center for Biotechnology Information. (2022d). *PubChem Compound Summary for Furfural (CID 7362)*. U.S. National Library of Medicine. Retrieved from <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7362>
- Ofosu, I. W., Ankar-Brewoo, G. M., Lutterodt, H. E., Benefo, E. O., & Menyah, C. A. (2019). Estimated daily intake and risk of prevailing acrylamide content of alkalized roasted cocoa beans. *Scientific African*, 6, e00176. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00176>
- Pápai, Z. S., & Pap, T. L. (2002). Determination of chromatographic peak parameters by nonlinear curve fitting using statistical moments. *Analyst*, 127(4), 494-498. <https://doi.org/10.1039/B111304F>
- Pardo, O., Yusá, V., Coscollá, C., León, N., & Pastor, A. (2007). Determination of acrylamide in coffee and chocolate by pressurised fluid extraction and liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Food Additives & Contaminants*, 24, 663-672. <https://doi.org/10.1080/02652030701235198>
- Park, H. H., Nam, D., Lee, J. Y., Song, J., Lee, H., Jung, M. Y., Lee, S. M., & Kim, Y. S. (2023). Effects of chlorogenic acid on the formations of furan, acrylamide, α -dicarbonyls and volatile compounds in canned coffee model systems. *LWT*, 188, 115338. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115338>
- Petisca, C., Pérez-Palacios, T., Farah, A., Pinho, O., & Ferreira, I. (2013). Furans and other volatile compounds in ground roasted and espresso coffee using headspace solid-phase microextraction: effect of roasting speed. *Food and Bioprocess Processing*, 91(3), 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.10.003>

- Quarta, B., & Anese, M. (2012). Furfurals removal from roasted coffee powder by vacuum treatment. *Food Chemistry*, 130(3), 610-614. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.083>
- Rahn, A., & Yeretdzian, C. (2019). Impact of consumer behavior on furan and furan-derivative exposure during coffee consumption: A comparison between brewing methods and drinking preferences. *Food Chemistry*, 272, 514-522. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.078>
- Recknagel, S., Koch, M., K öppen, R., Buttler, S., Penk, S., Mauch, T., Sommerfeld, T., & Witt, A. (2020). Development of certified reference materials for the determination of cadmium and acrylamide in cocoa. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 412(19), 4659-4668. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02719-0>
- Schouten, M. A., Tappi, S., Angeloni, S., Cortese, M., Caprioli, G., Vittori, S., & Romani, S. (2021): Acrylamide formation and antioxidant activity in coffee during roasting - A systematic study. *Food Chemistry*, 343, 128514. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128514>
- Şenyuva, H. Z., & Gökmen, V. (2005). Survey of acrylamide in Turkish foods by an in-house validated LC-MS method. *Food Addit Contam.*, 22(3), 204-209. <https://doi.org/10.1080/02652030512331344178>.
- Shi, J., Shao, Z., Li, H., Zhang, Y., & Wang, S. (2019). Co-extraction and co-purification coupled with HPLC-DAD for simultaneous detection of acrylamide and 5-hydroxymethyl-2-furfural in thermally processed foods. *Molecules*, 24(20), 3734.
- Sun, G., Wang, P., Chen, W., Hu, X., Chen, F., & Zhu, Y. (2022). Simultaneous quantitation of acrylamide, 5-hydroxymethylfurfural, and 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine using UPLC-MS/MS. *Food Chem.*, 375, 131726. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131726>
- van Lancker, F., Adams, A., Owczarek, A., de Meulenaer, B., & de Kimpe, N. (2009). Impact of various food ingredients on the retention of furan in foods. *Molecular Nutrition & Food Research*, 53, 1505-1511. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200800565>
- Volmer, D. A., & Jessome, L. L. (2006). Ion suppression: a major concern in mass spectrometry. *LCGC North America*, 24(5), 498-510.
- Wang, D., Liu, Z., Chen, W., Lan, X., Zhan, S., Sun, Y., Su, W., Lin, C. C., & Ni, L. (2023). Comparative study of the volatile fingerprints of roasted and unroasted oolong tea by sensory profiling and HS-SPME-GC-MS. *Current Research in Food Science*, 6, 100442. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100442>
- Wawrzyniak, R., & Jasiewicz, B. (2019). Straightforward and rapid determination of acrylamide in coffee beans by means of HS-SPME/GC-MS. *Food Chem.*, 301, 125264. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125264>

- Wenzl, T., Lachenmeier, D. W., & Gökmen, V. (2007). Analysis of heat-induced contaminants (acrylamide, chloropropanols and furan) in carbohydrate-rich food. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 389, 119-137. <https://doi.org/10.1007/s00216-007-1459-9>
- Wu, J. Y., Shi, Z. G., & Feng, Y. Q. (2009). Determination of 5-hydroxymethylfurfural using derivatization combined with polymer monolith microextraction by high-performance liquid chromatography. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(10), 3981-3988. <https://doi.org/10.1021/jf900434n>
- Xian, Y., Wu, Y., Dong, H., Chen, L., Zhang, C., Hou, X., Zeng, X., Bai, W., & Guo, X. (2019). Modified QuEChERS purification and Fe₃O₄ nanoparticle decoloration for robust analysis of 14 heterocyclic aromatic amines and acrylamide in coffee products using UHPLC-MS/MS. *Food Chem.* 285, 77-85. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.132>
- Zeng, S., Chen, W., Ye, J., & Yang, C. (2020). Investigation on the contents of acrylamide in baked and fried foods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 512(1), 012058. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/512/1/012058>
- Zhu, D., & Chang, J. (2008). Annual variations of biotic integrity in the upper Yangtze River using an adapted index of biotic integrity (IBI). *Ecol Indic* 8, 564-572. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2007.07.004>.
- Zhu, M., Yang, L., Zhang, W., Cai, C., & Zhou, X. (2019). Determination of acrylamide in coffee by ultra performance liquid chromatography-atmospheric pressure chemical ionization tandem mass spectrometry. *Chinese Journal of Chromatography*, 37(2), 189-193. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1123.2018.10038>.
- Zoller, O., Sager, F., & Reinhard, H. (2007). Furan in food: headspace method and product survey. *Food Additives & Contaminants*, 24(Suppl. 1), 91-107, <https://doi.org/10.1080/02652030701447389>.
- Żyżelewicz, D., Oracz, J., Krysiak, W., Budryn, G., & Nebesny, E. (2017). Effects of various roasting conditions on acrylamide, acrolein, and polycyclic aromatic hydrocarbons content in cocoa bean and the derived chocolates. *Drying Technology*, 35, 363-374. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1175470>.

Capítulo 4

Cinética de formación de compuestos neoformados durante la etapa de tostado

Formation kinetics of neoformed compounds during the roasting stage

Resumen

El tostado de café y cacao es un proceso térmico no isoterma en el que la concentración de compuestos neoformados (NFCs) evoluciona dinámicamente como resultado de reacciones simultáneas de formación y degradación. Este capítulo aplica principios de cinética química para modelar cuantitativamente la evolución de los NFCs, integrando la temperatura, el tiempo, las propiedades de la matriz y la disponibilidad de precursores, con el fin de identificar condiciones de proceso que equilibren la calidad tecnológica y la seguridad alimentaria. El estudio de caso evidenció comportamientos cinéticos diferenciados. La acrilamida (AA) mostró una cinética de formación-consumo con un perfil tipo “campana”, con máximos cercanos al primer crack y una disminución posterior debido al agotamiento de los precursores y a la degradación térmica. En contraste, los furanos (HMF y FFA) tendieron a acumularse en etapas tardías, favorecidos por una mayor severidad térmica, una mayor acidez y una menor actividad de agua. El modelo cinético (180 °C - 220 °C) describió adecuadamente la hidrólisis de sacarosa, el consumo de asparagina y la evolución de AA ($R^2 > 0,88$), pero presentó un bajo desempeño para glucosa y fructosa ($R^2 < 0,5$), lo que sugiere rutas paralelas no contempladas y limita su capacidad predictiva. La modelización cinética constituye así una herramienta útil para optimizar perfiles de tostado; no obstante, su validez depende de los supuestos del modelo y de la heterogeneidad de la matriz, por lo que debe interpretarse como una aproximación operativa y validarse experimentalmente.

Palabras clave: *cinética química, modelado cinético, reacción de Maillard, contaminantes de proceso, seguridad alimentaria.*

Abstract

Coffee and cocoa roasting is a non-isothermal thermal process in which the concentrations of neoformed compounds (NFCs) evolve dynamically due to concurrent formation and degradation reactions. This chapter applies principles of chemical kinetics to quantitatively model the evolution of NFCs by integrating temperature, time, matrix properties, and precursor availability, with the aim of identifying processing conditions that balance technological quality and food safety. The case study revealed compound-specific kinetic behaviors. Acrylamide (AA) exhibited a formation–consumption profile characterized by a bell-shaped curve, reaching maximum levels near the first crack and subsequently declining due to precursor depletion and thermal degradation. In contrast, furan derivatives (HMF and FFA) tended to accumulate at later roasting stages, favored by higher thermal severity, increased acidity, and low water activity. The kinetic model (180 °C - 220 °C) adequately described sucrose hydrolysis, asparagine consumption, and AA evolution ($R^2 > 0.88$), but performed poorly for glucose and fructose ($R^2 < 0.5$), suggesting the presence of parallel consumption pathways not captured by the model and thus limiting its predictive capability. Kinetic modeling, therefore, represents a useful tool for optimizing roasting profiles; however, its validity depends on underlying model assumptions and matrix heterogeneity, and it should be interpreted as an operational approximation that requires experimental validation.

Keywords: *chemical kinetics, kinetic modeling, Maillard reaction, process contaminants, food safety.*

Introducción

Este capítulo presenta las bases y aplicaciones de la cinética química para describir la formación de compuestos neoformados (NFCs) durante el tostado. Partimos de las leyes de velocidad y su dependencia térmica (Arrhenius), introducimos el caso no isoterma mediante el tiempo equivalente y conectamos estos conceptos con las rutas químicas (Maillard, caramelización y pirólisis) y con factores de matriz (variedad, vía de beneficio, a w, pH).

La cinética química es una rama de la química que estudia la velocidad de las reacciones químicas y los factores que la influyen. La velocidad de reacción se define como la variación en la concentración de reactivos o productos por unidad de tiempo. En su forma más simple, la ecuación $A \rightarrow B$ ilustra la ley de acción de masas, la cual establece que la velocidad de conversión del reactivo A en el producto B es proporcional a la concentración de A. Es decir, al aumentar la concentración de A, se incrementa la frecuencia de colisiones moleculares

efectivas, lo que resulta en una mayor velocidad de formación del producto. La ecuación de velocidad o ley de velocidad es una expresión cuantitativa del cambio en la concentración de moléculas de reactivo o producto en el tiempo. Entre los factores que afectan estas velocidades se encuentra la temperatura, naturaleza y concentración de reactivos y la presencia de catalizadores. Estas reacciones pueden expresarse a través de la ecuación $v = k[A]^n$, donde k es la constante cinética, A es el reactivo y n es el orden de la reacción. El orden de reacción es la suma de los exponentes de los términos de concentración de reactivos en la ecuación, se clasifican en orden cero, primer y segundo orden.

La reacción de orden cero se caracteriza por tener una relación lineal entre la concentración del reactivo o compuesto con el tiempo de reacción, siguiendo la siguiente ecuación:

$$A(t) = A_0 - kt$$

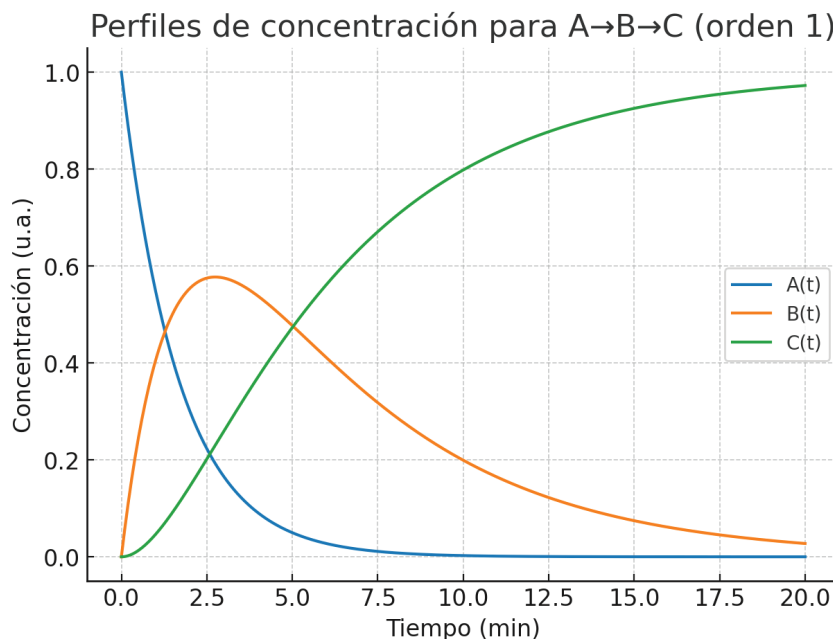
La de primer orden se caracteriza por un cambio logarítmico en la concentración

de un compuesto con el tiempo: $\ln\left(\frac{A}{A_0}\right) = -kt$. Donde, A es la concentración, A_0 es la concentración inicial, k es la constante de velocidad y t es el tiempo.

La constante de velocidad (k) es el parámetro de la ley de velocidad; es independiente de la concentración, pero depende de T (Arrhenius) y, a veces, del medio (pH, fuerza iónica, actividad de agua). Por ejemplo, para una reacción de primer orden, la k tiene unidades de tiempo^{-1} , mientras la de segundo orden tiene unidades de $\text{concentración}^{-1} \text{ tiempo}^{-1}$. La constante de velocidad de una reacción de enésimo orden tiene unidades de $\text{concentración}^{-(n-1)} \text{ tiempo}^{-1}$.

La figura 1 ilustra un sistema consecutivo $A \rightarrow B \rightarrow C$ de primer orden, típico de los compuestos neoformados durante el tostado. El reactivo A decrece exponencialmente, el intermedio B muestra un perfil de formación–consumo (curva en “campana”) y el producto C se acumula hacia una meseta. La posición y altura del máximo de B dependen de la relación entre las constantes k_1 ($A \rightarrow B$) y k_2 ($B \rightarrow C$): cuanto mayor es k_1/k_2 , más temprano y pronunciado es el pico. Este comportamiento, como se argumenta más adelante en el capítulo, explica por qué HMF, FFA o AA aumentan al inicio del tueste y luego disminuyen por transformación o pérdida, y sustenta estrategias de mitigación ajustando el perfil tiempo–temperatura para atravesar rápido la zona de máximo o desplazarla.

Figura 1. Perfiles de concentración para $A \rightarrow B \rightarrow C$ en función del tiempo en cuanto a la dependencia de la temperatura es posible expresarla mediante la ecuación de Arrhenius



$$k = A \cdot e^{\frac{-E_a}{RT}}$$

En la cual, k es la constante de velocidad de la reacción, que indica cuán rápida ocurre la transformación de reactivos en productos. A es el factor preexponencial o factor de frecuencia, que representa la frecuencia con la que ocurren colisiones entre moléculas con la orientación adecuada para reaccionar. R es la constante universal de los gases, cuyo valor es de $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$, y T es la temperatura absoluta (expresada en kelvin, K), que representa la energía térmica disponible en el sistema. El término k aumenta exponencialmente cuando aumenta la temperatura. La energía de activación (E_a) está relacionada con la barrera de energía que deben superar los reactivos para transformarse en productos, por lo tanto, un alto valor de esta genera una disminución de k y, por ende, de v . Otra forma de trabajar esta ecuación es mediante su forma linealizada, aplicando logaritmos neperianos a ambos lados se obtiene la siguiente ecuación:

$$\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T}$$

En procesos no isoterms como el tostado, el historial térmico $T(t)$ puede condensarse en un tiempo equivalente a una temperatura de referencia T_{ref} usando el integral de Arrhenius. Si $k(T) = Ae^{\frac{-Ea}{RT}}$, la “dosis cinética” acumulada y el tiempo equivalente se expresan como:

$$t_{eq}(T_{ref}) = \frac{1}{k(T_{ref})} \int_0^t k(T(\tau)) d\tau.$$

Así, cualquier perfil $T(t)$ se expresa como un tiempo isoterma a T_{ref} que produciría el mismo avance de reacción, facilitando la comparación de tuestes y el diseño de perfiles térmicos.

El estudio de la cinética química permite no solo comprender la velocidad con la que ocurren las reacciones, sino también predecir cómo distintos factores afectan dicha velocidad. Entre estos, la temperatura desempeña un papel determinante, y su efecto puede describirse cuantitativamente mediante la ecuación de Arrhenius, la cual vincula la constante de velocidad K con la energía de activación y la temperatura del sistema. Esta relación es particularmente relevante en sistemas térmicos, como los procesos de tostado, horneado o fritura, donde compuestos de interés como los compuestos neoformados se generan a partir de precursores reactivos mediante mecanismos complejos dependientes del calor. Al aplicar la forma linealizada de la ecuación de Arrhenius, es posible estimar la energía de activación asociada a cada ruta de formación, lo cual resulta esencial para modelar la cinética de formación de compuestos como el hidroximetilfurfural (HMF), furfural, acrilamida o furano. Estos modelos cinéticos permiten identificar las condiciones críticas de procesamiento y proponer estrategias de mitigación, sin comprometer las características sensoriales o tecnológicas del alimento.

Mecanismos de formación de NFCs durante el proceso de tostado

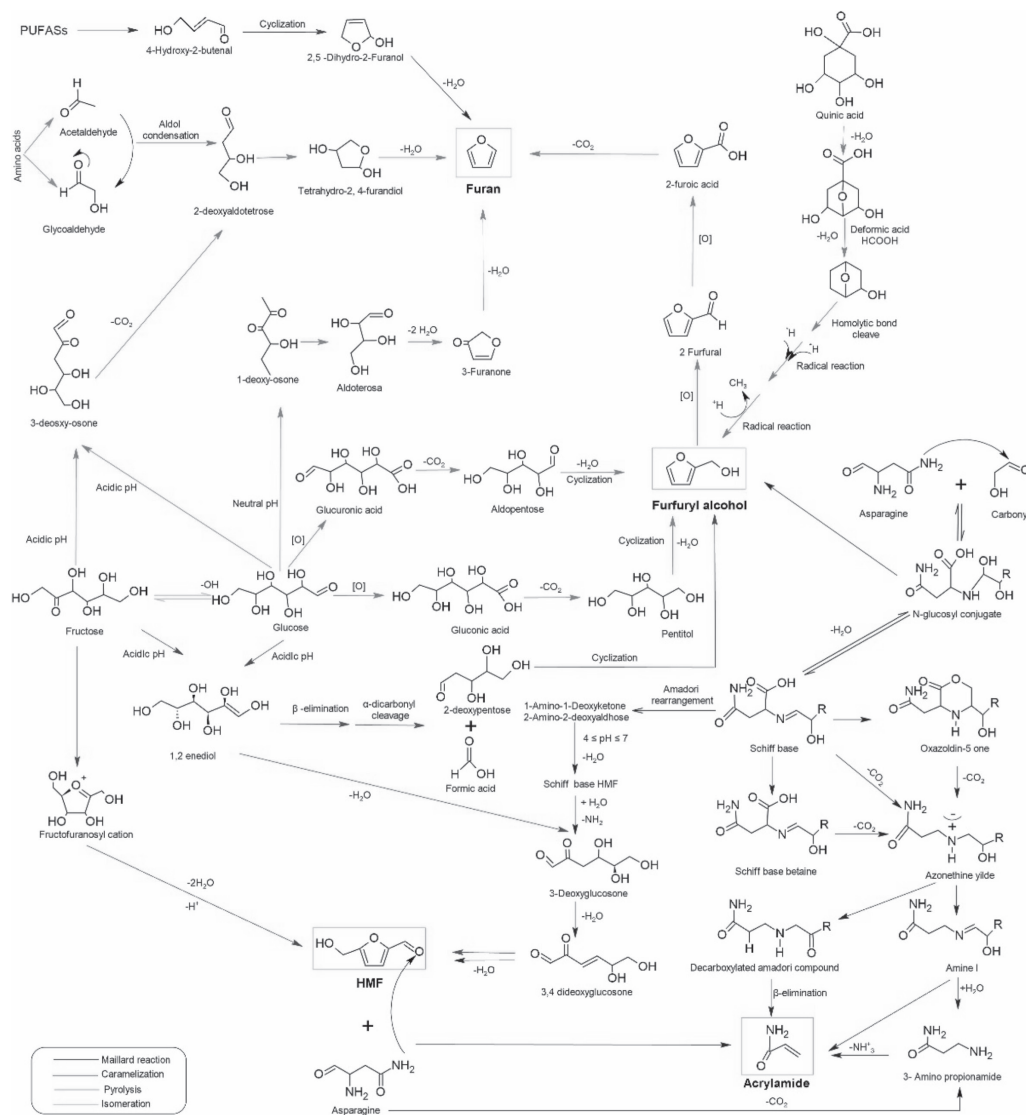
En este apartado se discutirán las rutas químicas que originan los compuestos neoformados durante el tostado, abordando (i) la reacción de Maillard, las etapas de Schiff, Amadori/Heyns, α -dicarbonilos, como vía predominante hacia acrilamida y co-formadora de HMF; (ii) la caramelización/isomerización de azúcares que produce HMF y furfural; (iii) la termodegradación de ácidos orgánicos que conduce a alcohol furfúrico (FFA); y (iv) aportes menores desde lípidos. Se enfatiza el carácter de red con intermedios y sumideros (p. ej., melanoidinas, conversión de HMF a ácidos), la volatilidad de varios furánicos y

la fuerte dependencia de la T, tiempo, la a_w y el pH, lo que explica los perfiles de formación-consumo y orienta estrategias de mitigación.

La figura 2 sintetiza estas rutas, diferenciando la reacción de Maillard, la caramelización/isomerización y la termodegradación. La reacción de Maillard (RM) es una de las transformaciones más relevantes durante el procesamiento térmico de alimentos (Pedreschi & Mariotti, 2023) y constituye una vía central de formación de compuestos neoformados como HMF y acrilamida (Anese et al., 2010). Se trata de un pardeamiento no enzimático entre grupos carbonilo de azúcares reductores (glucosa y fructosa) y grupos amino de aminoácidos, péptidos o proteínas, cuyo alcance depende del método de procesamiento, la temperatura, el pH y la actividad de agua, entre otros (Starowicz & Zieliński, 2019; Tamanna & Mahmood, 2015). La RM comprende una red de reacciones: condensación carbonilo-amino para formar base de Schiff, reordenamiento de Amadori/Heyns e incremento de reactividad hacia α -dicarbonilos como 3-DG, MGO y GO (Barrios et al., 2022). Un paso decisivo es la formación de 3-aminopropionamida (3-APA) a partir de la base de Schiff de asparagina (ASN). La β -eliminación de 3-APA genera acrilamida, por lo que su cuantificación o inferencia actúa como marcador de la ruta dominante Asn + carbonilos. Como se sintetiza en la Figura 2, estas etapas y sus ramificaciones conducen a la formación de HMF, furfural/derivados furánicos y, de manera predominante, a acrilamida mediante la reacción de asparagina con carbonilos.

Los compuestos de la reacción de Amadori (ARP, por sus siglas en inglés), en la etapa intermedia de la reacción de Maillard, pueden tomar diferentes vías de reacción dependiendo de la concentración original de azúcar reductor y de las condiciones de pH, formando diversas moléculas activas que contribuyen al aroma del producto, así como a los NFC (acrilamida, furano, FFA y HMF). El ARP obtenido a partir de una hexosa como la glucosa, en una reacción a pH neutro o en condiciones ácidas, es la base de Schiff del HMF, que se forma por un mecanismo de enolización 1,2 o 1,3. Posteriormente se elimina un compuesto amino y se añade una molécula de agua para obtener el HMF (Barrios et al., 2022). Para la etapa final, los aminoácidos se destruyen y se generan productos de fisión de HMF como el piruvaldehído y el diacetilo. Los grupos carbonilo se condensan con grupos amino libres, haciendo que se incorpore nitrógeno en los productos de reacción, lo que da como resultado la formación de aldehídos y α -aminocetonas, conocida como reacción de degradación de Strecker. Después de eso, tiene lugar una serie de reacciones en una etapa avanzada, que incluyen ciclaciones, deshidrataciones, retroaldolizaciones, reordenamientos, isomerizaciones y más

Figura 2. Red de formación de compuestos neoformados durante el tostado (adaptada de Barrios et al., 2022)



condensaciones, lo que eventualmente contribuye a la aparición de polímeros y copolímeros nitrogenados marrones llamados melanoidinas (Tamanna y Mahmood, 2015, Starowicz y Zieliński, 2019).

La caramelización y la pirólisis también hacen parte de las reacciones de interés para la formación de NFC como el HMF y FFA, son igualmente unas reacciones de pardeamiento no enzimáticas que se producen durante el procesamiento

térmico a alta temperatura (Kocadağlı & Gökmen, 2019) y el almacenamiento de productos alimenticios. Generalmente, ocurre a temperaturas $> 120\text{ }^{\circ}\text{C}$. La pirólisis de la glucosa se ha propuesto como una de las principales vías de formación de FFA (Yaylayan y Keyhani, 2000). La oxidación de los carbonos C1 y C6 de la glucosa produce ácido glucónico y ácido glucurónico. Posteriormente, estos compuestos sufren descarboxilación obteniendo pentitol y aldopentosa, que luego, a través de procesos de deshidratación y ciclización, dan lugar a la formación de FFA (Yaylayan & Keyhani, 2000).

También se ha sugerido que la escisión del retro-aldol en el enlace C1-C2 de la 1-deoxi-1-amino-3-hexulosa (formada a partir del compuesto Amadori), produce una aldopentosa que puede deshidratarse y ciclizarse a FFA (Wnorowski & Yaylayan, 2000). La glucosa o la fructosa también pueden sufrir reacciones de isomerización durante el tostado. A partir del intermediario clave en la reacción de isomerización 1,2-enediol, se produce 3-deoxialquildocetosa por β -eliminación. Este compuesto sufre una reacción de escisión que produce 2-deoxipentosa y ácido fórmico. La 2-deoxipentosa reacciona por ciclización y aromatización formando FFA (Brands & Van Boekel, 2001).

El pH modula la enolización 1,2/1,3 de hexosas: condiciones ácidas favorecen HMF; valores cercanos a neutro desplazan la red hacia α -dicarbonilos. La actividad de agua (*aw*) entre 0,4–0,8 maximiza la conversión por RM; *aw* alta diluye reactivos y *aw* muy baja limita movilidad. Dentro de los productos de caramelización se incluyen oligómeros con hasta seis unidades de carbohidratos formadas mediante la formación de enlaces glicosídicos no selectivos, productos de deshidratación de oligómeros que pierden hasta un máximo de ocho moléculas de agua, productos de hidratación de oligómeros de azúcar, productos de desproporción y productos aromáticos coloreados, durante esta reacción uno de los principales compuestos generados son el HMF.

Otra reacción de interés es, la descomposición o degradación térmica de polifenoles, se ha informado que los ácidos clorogénicos, poseen moléculas de ácido quínico y ácido cafeico en la matriz del café, los cuales se degradan en compuestos de menor peso molecular mediante tratamiento térmico y posteriormente producen algunas sustancias químicas volátiles, como el alcohol furfurílico en sistemas modelo (Moon & Shibamoto, 2010).

Por otro lado, es importante mencionar que, en sistemas modelo sometidos a altas temperaturas, el HMF es un compuesto intermediario en la RM y actúa

como precursor de la formación AA, pero esta formación es menos potente que la reacción entre los compuestos carbonilos, tales como azúcares reductores, con la asparagina (Ma Y. et al., 2022), siendo esta última el reactivo limitante. Además de actuar como intermedio, el HMF se dirige a sumideros: (i) reacciones de apertura a ácido levulínico y ácido fórmico y (ii) incorporación a melanoidinas por condensaciones carbonilo-amino. También la AA podría formarse a partir de lípidos a través de los compuestos de la unidad de tres carbonos (ácido acrílico) producido a partir de lípidos superiores a temperaturas elevadas.

La ocurrencia de todas estas reacciones depende totalmente de la composición química de la matriz alimentaria, que determina la disponibilidad de precursores como los azúcares, aminoácidos, proteínas, y compuestos bioactivos, entre otros. Entre los factores que influyen esta disponibilidad encontramos la variedad, en este sentido para el café, la variedad robusta presenta mayores contenidos de asparagina comparados con los de la arábica, por ende, tiene mayor potencial de formación de AA (Bagdonaite et al., 2008; Mesías & Morales, 2016); el contenido de azúcares como la sacarosa es más alto en la variedad arábica, lo cual supone una mayor disponibilidad para formación de furanos mediante reacciones de degradación térmica, así como para la generación de AA mediante la reacción de Maillard.

En cuanto a disponibilidad de ácidos clorogénicos en grano verde, es mayor en la robusta, lo cual da paso a una mayor formación de compuestos furánicos como el FFA, mediante degradación térmica, para formar ácido quínico y cafeico, que al someterse a procesos de deshidratación dan origen al FFA (Ghosh & Venkatachalapathy, 2014).

Por otro lado, también se considera como factor de influencia la vía de beneficio empleada (seca, semiseca y húmeda). La vía semiseca o honey, presenta contenidos más altos de sacarosa (8,8%), comparado con la vía natural (8,36%) y la húmeda (8,44%), incrementando la disponibilidad de carbonilos tras hidrólisis (glucosa y fructosa) y, por tanto, el potencial de formar HMF/furanos y AA; sin embargo, el efecto neto depende del perfil de tostado, la actividad de agua (a_w) y el pH de la matriz. La disponibilidad de ácidos clorogénicos se ha reportado que es mayor para cafés procesados por vía natural y honey (Osorio et al., 2022, Scholz et al., 2019, Nogaim et al., 2013; Zhu et al., 2021 y Atlabachew et al., 2021).

Otro factor que podría afectar el desarrollo de cada una de las reacciones que hacen parte de las rutas de formación de contaminantes generados por

procesamiento (NFC), es la actividad de agua, la cual refiere al agua disponible o no ligada en la matriz. Se ha reportado que valores altos de a_w no permiten un correcto desarrollo de la reacción de Maillard, afectando la formación de NFC, valores de a_w entre 0,4-0,8 se asocian a condiciones óptimas para alcanzar puntos máximos de formación tanto para AA como para HMF (Bassama et al., 2011; da Costa et al., 2023).

Además, como se ha mencionado en los apartados anteriores, la temperatura y el tiempo gobiernan la formación y la degradación de los NFCs. Cuando la temperatura varía con el tiempo (condiciones no isothermas), la constante de velocidad aumenta con T según Arrhenius, de modo que la formación se acelera de manera no lineal; en condiciones isothermas, la evolución temporal depende del orden y de si describimos consumo o formación (Gökmen et al., 2006).

En este sentido, la concentración de AA que puede contener un alimento es directamente proporcional al aumento de temperatura al que se ha sometido. Para el FFA también se ha reportado que las concentraciones máximas se alcanzan más rápido cuando las temperaturas son más altas. En la práctica, mayores temperaturas elevan y adelantan los máximos de concentración: la AA tiende a aumentar con T y, para el FFA, se ha observado que los máximos se alcanzan antes a T más altas (p. ej., mayor a 240°C que a 180°C) (Albouchi & Murkovic, 2018).

Para comparar perfiles no isothermos de manera objetiva, es útil resumir el historial térmico mediante el tiempo equivalente de reacción, obtenido a partir de la integral de Arrhenius.

Estudios experimentales de modelos cinéticos sobre la cinética de formación NFCs

En el estudio de la cinética de la reacción de compuestos, se construye un modelo matemático que incorpora mecanismos hipotéticos para representar de forma útil (no exacta) los fenómenos observados. El proceso consta de dos fases: (i) formulación del modelo y (ii) prueba del modelo. Primero se plantean ecuaciones que describen el mecanismo plausible del proceso; después se diseña y ejecuta un experimento del cual se obtienen datos para contrastar el modelo y evaluar su ajuste. En alimentos, este flujo de trabajo suele seguir: mecanismo hipotético → ecuaciones diferenciales → diseño experimental (temperatura, tiempo, humedad, composición) → estimación de parámetros (regresión no lineal) → validación (R^2 , RMSE, residuos, plausibilidad fisicoquímica) → discriminación de mecanismos

→ extrapolación térmica con Arrhenius $\ln(k) = \ln(A) - \frac{E_a}{RT}$.

La modelización cinética tiene aplicaciones amplias en ciencias químicas y, en particular, en ciencia y tecnología de alimentos. Se ha empleado para estudiar catálisis enzimática en bioprocesos, inactivación microbiana y enzimática durante el procesado, pérdida de pigmentos, velocidad e inhibición de la reacción de Maillard, transesterificación de aceites, degradación de almidón y otros fenómenos. La cinética es especialmente útil para predecir estabilidad y calidad a lo largo del tiempo: conocer la velocidad de una reacción en función de la concentración del reactivo y su dependencia de la temperatura y otras variables permite estimar el tiempo necesario para alcanzar cambios relevantes en calidad. En la industria alimentaria se han reportado varios estudios que formulan modelos cinéticos mecanicistas o empíricos para describir la formación de compuestos neoformados (NFCs), entre ellos 5-hidroximetilfurfural (HMF), furfural (FFA) y acrilamida (AA).

Knight et al. (2021) propusieron un sistema cinético para la formación de AA en patata durante fritura, con el objetivo de proporcionar una descripción matemática de la evolución temporal de AA que fuera reutilizable para interpretar resultados futuros. El modelo consideró la composición (azúcares y aminoácidos), la temperatura de fritura y el contenido de humedad final. Su hipótesis incluyó que, al no existir una interconversión significativa entre glucosa y fructosa en la escala temporal del proceso, debía existir un intermediario común en la formación de productos de Maillard, siendo la AA un producto final cuya formación compite por asparagina frente a otros aminoácidos. Bajo sus condiciones, el ajuste indicó que la vía dependiente de glucosa por caramelización contribuyó en mayor medida a la AA que la vía de Maillard.

En café, Hamzalıoğlu & Gökmen (2020) construyeron un modelo cinético multirrespuesta que integró las principales vías de Maillard y caramelización, incluyendo intermediarios relevantes. Los resultados indicaron que la sacarosa se degrada a glucosa y a un catión fructofuranosilo reactivo. La glucosa participó especialmente en la formación de glioxal y, sobre todo, de 3-desoxiglucosona, más que directamente en AA; por su parte, el catión fructofuranosilo favoreció la formación de HMF, que emergió como precursor intermedio importante de AA durante el tostado del café.

Para comprender la contribución relativa de rutas específicas, Gökmen et al. (2012) estudiaron sistemas modelo binarios ASN-GLC y ASN-HMF, además de los componentes individuales, calentados en tubos sellados con sílica-gel a 90, 120, 150 y 180°C durante 5-60 min. La formación de AA en el sistema ASN-GLC

mostró un aumento aproximadamente lineal con la temperatura dentro del rango evaluado, mientras que en ASN-HMF el aumento fue marcadamente exponencial. A temperaturas $\leq 120^{\circ}\text{C}$, ASN-GLC produjo más AA; a temperaturas $>120^{\circ}\text{C}$, ASN-HMF dominó. Zhu et al. (2022) investigaron la formación de contaminantes térmicos en granos de café arábica tostados a 190, 215 y 240°C durante 3-120 min, modelando HMF, AA, furano (F), 2-metilfurano (2-MF) y 3-metilfurano (3-MF). Las variaciones de pérdida de peso y humedad se ajustaron a cinética de primer orden: $C_t = A + Be^{-kt}$, donde C_t es la concentración (o contenido) en el tiempo t , k la constante de velocidad, y A , B constantes (siendo $A+B$ el valor inicial). La evolución de AA y HMF se describió como formación seguida de consumo (dos fases): una fase de crecimiento y una de decaimiento $C_t = C_2e^{-k_2t}$. Mecánicamente, este perfil “en campana” también puede representarse de forma parsimoniosa por la red $A \rightarrow B \rightarrow C$, donde el intermedio B alcanza un máximo: $B_t = \frac{k_1 A_0}{k_2 - k_1} (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t})$.

Para furanos o alcohol furfurilico, la dinámica de crecimiento se ajusta con

$$C_t = \frac{C_f}{1 + \left(\frac{C_f - C_0}{C_n}\right)e^{-rt}}$$

un modelo logístico en su forma canónica: $C_t = \frac{C_f}{1 + \left(\frac{C_f - C_0}{C_n}\right)e^{-rt}}$, donde C_0 es la concentración inicial, C_f la concentración de meseta y r una tasa aparente.

Şen y Gökmen (2023) propusieron un modelo cinético multirrespuesta para la formación de AA en cuatro tipos de nueces y semillas a 160, 180 y 200°C . Formularon ecuaciones diferenciales para cada etapa elemental de la red y estimaron las constantes de velocidad por regresión no lineal, resolviendo las EDO por integración numérica. El ajuste conjunto a los datos experimentales permitió discriminar etapas y mecanismos. De forma análoga, Berk et al. (2020) estudiaron el mecanismo de formación de HMF y AA en sésamo tostado ($180\text{--}220^{\circ}\text{C}$), monitorizando sacarosa, aminoácidos libres, asparagina, 3-desoxiglucosona, HMF y AA, y estimando las constantes de velocidad (k) para cada etapa de una red Maillard y caramelización.

Long et al. (2023) evaluaron la influencia de tiempo y temperatura de tostado sobre ácidos cafeoilquínicos (3-CQA, 5-CQA, 4-CQA) y HMF, observando un aumento inicial seguido de disminución; recomendaron tostados ligeros/medios para maximizar los bioactivos y minimizar HMF. En la cinética de FFA, Albouchi & Murkovic (2018) describieron un comportamiento comparable al de otros contaminantes de proceso (HMF, AA), con un máximo temprano tras el inicio del tostado y posterior descenso, destacando el papel determinante de temperatura y tiempo en las cantidades formadas.

Además de los modelos mecanicistas, se emplean modelos empíricos/estadísticos orientados a la predicción operativa cuando existen muchas covariables colineales o señales espectroscópicas. La regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) permite correlacionar variables de entrada (temperatura y tiempo de tostado, humedad, composición) con respuestas (concentración de NFCs) sin detallar los pasos elementales. Rief et al. (2021) exploraron la predicción de AA a partir de RMN de ^1H , logrando un RMSEP $\approx 79 \mu\text{g/kg}$ para cafés *Arábica* y *Canephora* tostados de medio a muy oscuro. Arazuri et al. (2019) combinaron NIRS con PLS para estimar precursores de AA (azúcares reductores y asparagina) en patata, con errores de predicción en el orden de 15-22 mg/g, mostrando utilidad para análisis rápido en muestras liofilizadas. Estos enfoques son valiosos para monitoreo y control de proceso, aunque su extrapolación fuera del dominio de calibración es limitada.

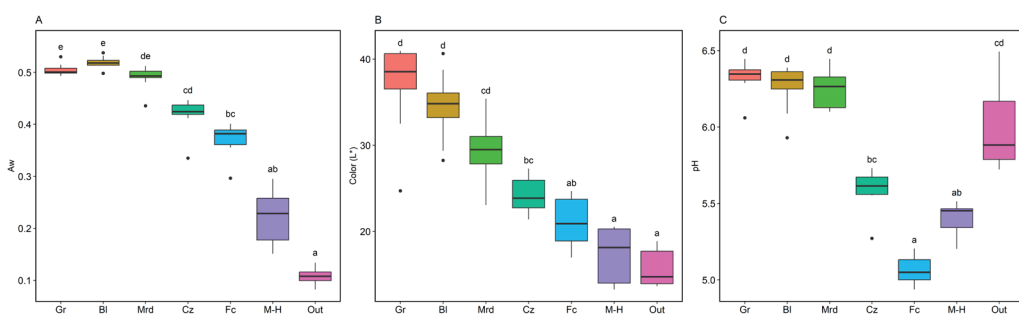
Los modelos mecanicistas (redes de reacción + EDO) ofrecen interpretabilidad fisicoquímica y extrapolación térmica mediante Arrhenius; son especialmente adecuados cuando se dispone de datos de calidad para varios intermediarios. Los modelos empíricos/multivariantes (p. ej., PLS sobre NIRS o RMN) proporcionan predicciones rápidas y útiles para control y cribado, dentro de un dominio definido por la calibración. Una estrategia combinada de mecanicista para entender y extrapolar y multivariante para predecir en línea es particularmente eficaz para describir y gestionar la formación de NFCs durante el tostado del café o cacao y procesos análogos.

Caso de estudio de cinética de NFC café tostado

Como se ha discutido, los compuestos neoformados (NFC) en particular la acrilamida (AA), el 5-hidroxiacetilfurfural (HMF) y el alcohol furfúrico (FFA) surgen durante el tostado por la acción combinada de la reacción de Maillard, la caramelización y degradaciones térmicas secundarias que transforman azúcares y aminoácidos. Su cuantificación cinética es crucial para equilibrar atributos sensoriales con seguridad alimentaria, ya que sus tasas de formación y consumo dependen de la severidad térmica, la humedad del sistema y la naturaleza de la matriz. En cacao y café, dos modelos de referencia del tostado, el seguimiento conjunto de NFC con marcadores de proceso (actividad de agua, pH, color L^*) y de sustrato (glucosa, fructosa y sacarosa) permite reconstruir una trayectoria donde es posible evaluar su comportamiento.

La figura 3 resume el efecto de la etapa de tostado en café sobre tres marcadores de proceso: actividad de agua, color L^* y pH en las siete fases definidas: Gr

Figura 3. Efecto de la etapa de tostado sobre marcadores de proceso en cacao y café: actividad de agua **(A)**, color L^* **(B)** y pH **(C)**. Las cajas muestran mediana y rango intercuartílico; bigotes = 1,5 IQR; puntos = valores atípicos. Letras distintas indican diferencias significativas entre etapas. Gr (inicio), Bl (equilibrio), Mrd (Maillard), Cz (caramelización), Fc (primer crack), M–H (desarrollo) y Out (salida)



(inicio), Bl (equilibrio), Mrd (Maillard), Cz (caramelización), Fc (primer crack), M–H (desarrollo) y Out (salida). Cada caja representa la distribución experimental por etapa, y las letras sobre las cajas indican los grupos estadísticamente diferentes ($\alpha=0,05$). El patrón es nítido y coherente con la física del tostado. La a_w desciende de forma casi monótona desde valores iniciales cercanos a 0,50–0,55 hasta mínimos $\approx 0,08$ –0,12 en Out (Figura 3A), con separaciones significativas en la mayoría de las transiciones de las diferentes etapas del tostado, lo que refleja la pérdida progresiva de humedad y la densificación de la matriz. En paralelo, L^* cae de ~ 40 en Gr/Bl a ~ 18 –22 en Out (Figura 3B), confirmando el oscurecimiento por formación de melanoidinas y pigmentos de caramelización; las diferencias estadísticas en cada una de las etapas valida el avance del pardeamiento. El pH muestra una trayectoria que varía en el tiempo de tostado (Figura 3C): se mantiene alto al inicio ($\sim 6,3$ –6,5 en Gr/Bl), desciende con fuerza entre Cz y Fc hasta $\sim 5,0$ –5,2 (máxima acidez aparente), y se recupera parcialmente durante M–H/Out ($\sim 5,6$ –6,2). Este “valle” sugiere una fase intermedia dominada por formación de ácidos (productos de Maillard tempranos y degradación de azúcares) seguida por consumo/transformación y pérdida por volatilización o descarboxilación de especies ácidas a mayor severidad, especialmente en desarrollo y salida.

Mecánicamente, la tríada $a_w \downarrow$, $L^* \downarrow$, $pH \cap$ perfila el marco para la cinética de NFC: (i) la caída de a_w acelera reacciones térmicas específicas y desplaza equilibrios de deshidratación; (ii) el oscurecimiento acompaña la depleción de sacarosa y la aparición de intermediarios furánicos; (iii) el mínimo de pH alrededor

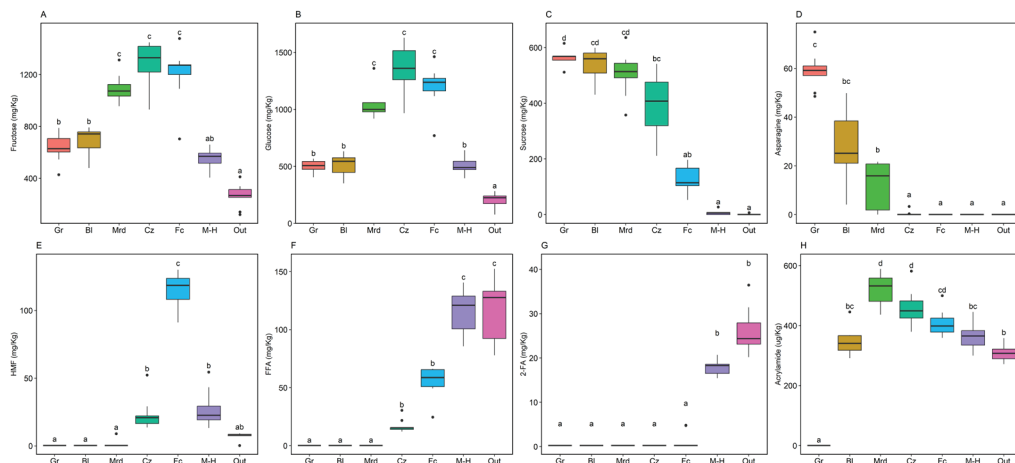
de Fc coincide con la ventana donde cabría esperar máximos transitorios de HMF y FFA y aumentos sostenidos de AA si no median degradaciones competitivas.

La figura 4 evidencia cómo los azúcares tienen un patrón de consumo y generación secundaria durante el tostado de café. Sacarosa (Figura 4C) decrece de forma marcada desde *Gr/Bl* y es prácticamente nula a partir de *M-H/Out*, coherente con su inversión térmica y participación en Maillard/caramelización. En paralelo, glucosa (Figura 4B) y fructosa (Figura 4A) exhiben máximos intermedios, típicamente en *Cz/Fc*, producto de la hidrólisis de sacarosa y su consumo posterior como reactivos de Maillard; el descenso final refleja su agotamiento en condiciones de mayor severidad.

Entre los NFC y precursores inmediatos, acrilamida (AA) (Figura 4D) es elevada en etapas tempranas (*Gr-Mrd*) y disminuye de forma sostenida a partir de *Cz* hasta niveles cercanos al límite de cuantificación en *M-H/Out*. Este comportamiento es consistente con formación temprana vía asparagina + azúcares reductores y degradación/volatilización en tuestes más severos. HMF (Figura 4E) presenta picos intermedios (máximo en torno a *Fc*) seguidos de una ligera caída hacia *Out*, acorde con su generación por deshidratación de hexosas y transformación posterior. Alcohol furfurílico (FFA) (Figura 4F) se incrementa tardíamente (alto en *M-H/Out*), compatible con la reducción de furfural y rutas de degradación de pentosas/intermedios de Maillard bajo baja actividad de agua. La tendencia de la cinética de formación del alcohol furfurílico es muy similar a la de otros derivados furánicos producidos en el café, como el HMF (Murkovic & Bornik, 2007), así como la acrilamida (Bagdonaite, Derler y Murkovic, 2008). De forma concordante, 2-ácido furoico (2-FA) (G) es prácticamente nulo hasta *Fc* y aumenta en *M-H/Out*, lo que indica la activación de vías furánicas favorecidas por temperaturas altas y humedad reducida. La asparagina libre (Figura 4H) muestra un máximo en etapas medias (*Mrd/Cz*) seguido de descenso en *Fc-Out*, patrón que sugiere liberación por hidrólisis/desnaturalización proteica y consumo en reacciones de Maillard.

Lo anterior lo podemos relacionar con la caída decreciente de L^* y a_w , junto con el mínimo de pH en torno a *Fc*, que facilita un entorno más ácido y menos acuoso que favorece la deshidratación de hexosas/pentosas: primero la sacarosa por hidrólisis (comportamiento decreciente), luego un pico transitorio de glucosa y fructosa (incremento), y a continuación la formación acelerada de HMF y furánicos (2-FA, FFA). En contraste, la acrilamida sigue una “campana” temporal: aumenta en etapas tempranas (cuando coexisten asparagina y azúcares reductores y el pH aún no ha caído) y luego desciende a partir de *Fc* por agotamiento de asparagina,

Figura 4. Evolución de sustratos, precursores y compuestos neoformados (NFC) a lo largo de las etapas del tostado en granos de cacao y café. Boxplots por etapa: Gr (inicio), Bl (equilibrio), Mrd (Maillard), Cz (caramelización), Fc (primer crack), M-H (desarrollo) y Out (salida)



incorporación a melanoidinas y vías de degradación que se favorecen a mayor severidad térmica y con pH más bajo. Así, los marcadores fisicoquímicos delimitan ventanas operativas: entre Cz y el inicio de Fc el sistema entra en el rango de aw y pH que maximiza la RM; ahí los furánicos empiezan a escalar, mientras AA se acerca a su máximo y ya insinúa descenso. Prolongar el proceso del tostado hacia M-H reduce AA de forma marcada con incrementos aún controlables de HMF/2-FA/FFA; empujar hasta Out aporta poco beneficio adicional sobre AA y sí un aumento desproporcionado de furánicos.

En términos cinéticos, extender el tueste desde Fc hasta M-H desplaza el sistema a un régimen de menor aw y menor valor de L^* más bajo, con un pH que ya ha tocado su mínimo, condiciones que aceleran la reacción de Maillard temprana; sin embargo, debido al agotamiento de asparagina y su incorporación a melanoidinas y aductos de dicarbonilos, hacen que la AA describa una curva unimodal: alcanza su máximo antes o alrededor de Fc y posteriormente disminuye con rapidez. En paralelo, la hidrólisis de sacarosa y la deshidratación de hexosas favorecen una acumulación casi monotónica de compuestos furánicos; HMF procede mayoritariamente de hexosas, mientras que el furfural y su reducción a FFA se ven impulsados por la mayor severidad térmica y la caída de L^* . Así, detener el proceso en M-H ofrece una relación “beneficio-riesgo” favorable, ya que la pendiente negativa de AA sigue siendo pronunciada, mientras que las pendientes de HMF/2-FA/FFA permanecen dentro de magnitudes controlables.

Forzar el tueste hasta *Out*, en cambio, apenas reduce más la AA porque el precursor limitante ya está agotado, pero sí intensifica reacciones de deshidratación y furanización, trasladando el sistema a una zona dominada de pirólisis leve, donde los furánicos aumentan de forma desproporcionada. Esta interpretación asume que a_w , L^* y pH post-tueste reflejan el microentorno reactivo; bajo ese supuesto, *M-H* representa la frontera operativa óptima entre seguridad química y severidad del proceso. En síntesis, las dos figuras sostienen la secuencia mecanística:

sacarosa ↓ → (*glucosa, fructosa*) ↑ → (*HMF, 2-FA, FFA*) ↑ → (*glucosa, fructosa*) ↓;

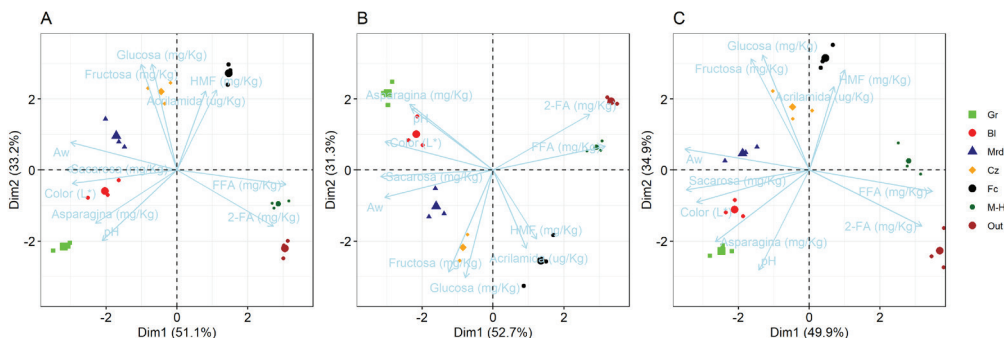
asparagina ↑ (*fase intermedia*) → AA ↑ (*fase temprano*) → AA ↓ (*fase tarde*)

y delimitando rangos de operación donde es posible minimizar AA sin incrementar exclusivamente los compuestos furánicos.

Un análisis multivariante mediante PCA de esta información a tres temperaturas diferentes (180, 200 y 220 °C) muestra un eje 1 (~50% de la varianza) que ordena las etapas del tueste desde *Gr/Bl* hacia *Out* como un gradiente de severidad, y un eje 2 (~30-35%) que separa matices entre fases intermedias. Es evidente que el 2-FA y FFA proyectan vectores largos y aproximadamente colineales (alta comunalidad y correlación positiva entre sí) y se oponen a a_w , y L^* (correlación negativa), coherente con lo descrito antes: conforme avanza el tostado descenden los marcadores de proceso y se acumulan furánicos. Esto encaja con la mecánica: menor a_w y L^* , y pH más bajo, favorecen deshidratación de hexosas y furanización; además, 2-FA y FFA comparten el precursor, de ahí su covariación. A la vez, sacarosa se orienta contra glucosa/fructosa, señal de su hidrólisis.

Por su parte, el HMF se asocia a la disponibilidad de hexosas en etapas tempranas y a la severidad térmica en etapas avanzadas, de modo que su alineación con glucosa/fructosa puede debilitarse conforme aquellas se agotan. La acrilamida y HMF parecen estar estrechamente correlacionados, presentando una fuerte relación con la etapa que describe el primer crack; es decir es esta etapa donde se identifica la mayor concentración de estos compuestos. En el PCA se observa una anticorrelación aparente entre AA/HMF y asparagina, consistente con el consumo progresivo del precursor nitrogenado a medida que avanza el tueste. No obstante, desde el punto de vista mecanístico, la disponibilidad de asparagina favorece la formación inicial de AA, mientras que el HMF se origina principalmente por deshidratación ácido-catalizada de hexosas y no depende directamente de la asparagina. Por tanto, esta anticorrelación global refleja principalmente el gradiente de severidad y la no monotonía de AA, más que un efecto directo negativo. En otras palabras, lo que se observa es un efecto del avance del proceso (consumo de Asn y acumulación de productos de transformación) y no constituye evidencia de que la asparagina inhiba la formación de AA o HMF.

Figura 5. Agrupamiento de las muestras por etapas en cada una de las curvas de tostado a 180 °C (A), 200 °C (B) y 220 °C (C). Gr (inicio), Bl (equilibrio), Mrd (Maillard), Cz (caramelización), Fc (primer crack), M-H (desarrollo) y Out (salida)



A continuación, se describe un modelo de balance de masas para la formación de acrilamida a partir de la hidrólisis de sacarosa (SAC), considerando la generación de glucosa (GLU) y fructosa (FRU), su consumo mediante reacciones con asparagina (ASN), así como la formación y degradación de acrilamida (AA).

$$\begin{aligned}\frac{d[SAC]}{dt} &= -k_1[SAC] \\ \frac{d[FRU]}{dt} &= \alpha k_1[SAC] - k_2[ASN][FRU] \\ \frac{d[GLU]}{dt} &= (1 - \alpha)k_1[SAC] - k_3[ASN][GLU] \\ \frac{d[ASN]}{dt} &= -k_2[ASN][FRU] - k_3[ASN][GLU] \\ \frac{d[AA]}{dt} &= ph(k_2[ASN][FRU] + k_3[ASN][GLU]) - k_4[AA]\end{aligned}$$

Donde:

k1: Constante de hidrólisis de la sacarosa (SAC → GLU/FRU).

α : Fracción de la hidrólisis que genera GLU (el resto genera FRU).

k2: Constante de reacción entre ASN y GLU (formación de AA).

k3: Constante de reacción entre ASN y FRU (formación de AA).

ph: Factor de rendimiento (0–1) de la conversión ASN·(GLU/FRU) en AA.

k4: Constante de degradación de AA hacia productos no modelados.

A partir de este modelo de ecuaciones diferenciales es posible formular un modelo cinético determinista acoplado basado en ecuaciones diferenciales

ordinarias (EDO) para las concentraciones de sacarosa (SAC), glucosa (GLU), fructosa (FRU), asparagina (ASN) y acrilamida (AA) en función del tiempo, considerando diferentes temperaturas de proceso (180, 200 y 220 °C).

El sistema asume una hidrólisis de primer orden de la sacarosa (k_1), un reparto estequiométrico de los carbonilos hacia GLU y FRU mediante un parámetro de partición θ , un consumo bimolecular de ASN con cada hexosa (constantes k_2 y k_3 , respectivamente), y una formación de AA proporcional al flujo de consumo de ASN (mediante rendimiento global ph), junto con una degradación global de AA de primer orden (k_4).

La siguiente tabla resume los resultados del ajuste cinético por temperatura, incluyendo las constantes estimadas, los errores de ajuste (RMSE), los coeficientes

Tabla 1. *Parámetros cinéticos ajustados y métricas de bondad de ajuste del modelo de formación de acrilamida a 180, 200 y 220 °C*

Temperatura		180	200	220
	k_1	0,17	0,35	0,35
	$\acute{a}$	0,49	0,66	0,62
	k_2	2,22E-14	0,000599	0,000898
	k_3	0,000416	4,96E-13	2,22E-14
	ph	0,02	0,014	0,012
	k_4	0,12	0,075	0,092
Sacarosa	RMSE	4,605	90,28	57,4
	R^2	0,999	0,839	0,911
Glucosa	RMSE	135,55	287,53	280,29
	R^2	0,45	0,48	0,39
Fructosa	RMSE	113,83	246,21	246,37
	R^2	0,49018	0,371	0,38
Asparagina	RMSE	7,8564	2,3781	5,3562
	R^2	0,87	0,98	0,94
Acrilamida	RMSE	0,064	0,034	0,0164
	R^2	0,89	0,96	0,98

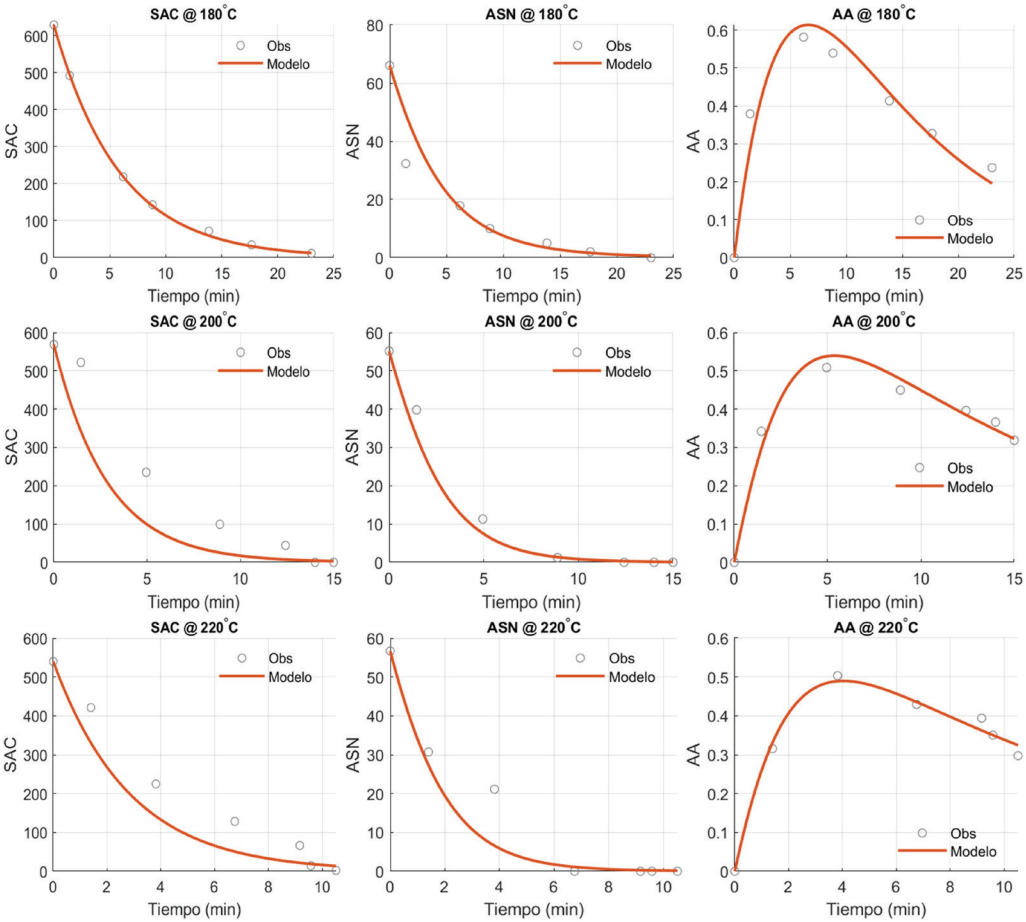
de determinación (R^2) y las condiciones iniciales utilizadas en el modelo. Esta información permite evaluar la capacidad del modelo para describir la evolución temporal de la hidrólisis de sacarosa, la formación y comportamiento de glucosa y fructosa, el consumo de asparagina y la formación de acrilamida.

Las constantes cinéticas de hidrólisis (k_1) y degradación de acrilamida (k_4) presentan unidades de min^{-1} , los parámetros de interacción ASN·GLU (k_2) y ASN·FRU (k_3), tienen unidades de $(\text{mg/kg})^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$, y los coeficientes de fracción (α) y rendimiento (ϕ) son adimensionales.

Los resultados obtenidos para el modelo cinético sin pérdidas inespecíficas de sacarosa muestran un comportamiento contrastante según la especie analizada (Figura 6). En el caso de la sacarosa (SAC), el ajuste es muy satisfactorio en todo el rango de temperaturas evaluadas (180 - 220 °C), con errores bajos ($\text{RMSE} < 100$) y valores de R^2 superiores a 0,83, lo que evidencia que la hidrólisis de primer orden descrita por k_1 reproduce adecuadamente la cinética experimental (Tabla 1). De hecho, el incremento de k_1 con la temperatura ($0,17 \rightarrow 0,35 \text{ min}^{-1}$) resulta consistente con el comportamiento esperado de un proceso activado térmicamente, reflejado en una energía de activación de 34,8 kJ mol^{-1} . En contraste, los perfiles de glucosa (GLU) y fructosa (FRU) presentan un ajuste deficiente, con errores extremadamente altos ($\text{RMSE} \approx 100 - 300$) y coeficientes de determinación cercanos a cero. Esto sugiere que la dinámica real de estos azúcares involucra rutas adicionales de consumo o degradación (p. ej., caramelización, formación de HMF o pérdidas por reacciones laterales) que no están representadas en el esquema propuesto.

El ajuste de la asparagina (ASN), por el contrario, es adecuado ($R^2 \approx 0,87 - 0,99$), lo que refleja que la combinación de las rutas ASN·GLU y ASN·FRU consigue describir la disminución experimental de este aminoácido. Asimismo, la acrilamida (AA) se describe de forma satisfactoria en todas las temperaturas ($\text{RMSE} < 0,07$, $R^2 > 0,88$), tal como se observa en la figura 6, donde la curva simulada sigue de manera precisa la fase de formación inicial y el posterior descenso por degradación. En conjunto, el modelo resulta útil para describir la hidrólisis de la sacarosa, el consumo global de ASN y la formación de AA, pero no es capaz de reproducir con rigor la cinética de la glucosa y la fructosa, lo que evidencia la necesidad de ampliar el mecanismo con vías de consumo alternativas para dichos azúcares.

Figura 6. Ajuste del modelo cinético sin pérdidas de SAC a las curvas experimentales de sacarosa (SAC), asparagina (ASN) y acrilamida (AA) a 180, 200 y 220 °C. Los puntos corresponden a los datos observados y las líneas al modelo simulado



Referencias

- Albouchi, A., & Murkovic, M. (2018). Formation kinetics of furfuryl alcohol in a coffee model system. *Food Chemistry*, 243, 91-95. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.09.112>
- Anese, M., Suman, M., & Nicoli, M. C. (2010). Acrylamide removal from heated foods. *Food Chemistry*, 119(2), 791-794. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.043>
- Arazuri, S., Pérez, C., López-Maestresalas, A., Morales, F. J., Mesias, M., & Jarén, C. (2019). Determinación de precursores de acrilamida en patata por NIRS (No. COMPON-2019-agri-3462).
- Atlabachew, M., Abebe, A., Alemneh-Wubieneh, T., & Tefera-Habtemariam, Y. (2021). Rapid and simultaneous determination of trigonelline, caffeine, and chlorogenic acid in green coffee bean extract. *Food Science and Nutrition*, 9(9), 5028-5035. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2456>
- Bagdonaite, K., Derler, K., & Murkovic, M. (2008). Determination of acrylamide during roasting of coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15), 6081-6086. <https://doi.org/10.1021/jf073051p>
- Barrios-Rodríguez, Y. F., Gutiérrez-Guzmán, N., Pedreschi, F., & Mariotti-Celis, M.S. (2022). Rational design of technologies for the mitigation of neo-formed contaminants in roasted coffee. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 223-235. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.034>
- Bassama, J., Brat, P., Bohuon, P., Hocine, B., Boulanger, R., & Günata, Z. (2011). Acrylamide kinetic in plantain during heating process: precursors and the effect of water activity. *Food Research International*, 44, 1452-1458. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.018>
- Berk, E., Hamzahoğlu, A., & Gökmen, V. (2020). Multiresponse kinetic modelling of 5-hydroxymethylfurfural and acrylamide formation in sesame (*Sesamum indicum* L.) seeds during roasting. *European Food Research and Technology*, 246, 2399-2410. <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03583-z>
- Brands, C. M. J., & Van Boekel, M. A. J. S. (2001). Reactions of monosaccharides during heating of sugar - Casein systems: Building of a reaction network model. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 49(10), 4667-4675. <https://doi.org/10.1021/jf001430b>
- da Costa, D.S., Albuquerque, T.G., Costa, H.S., & Bragotto, A.P.A. (2023). Thermal contaminants in coffee induced by roasting: A review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(8), 5586. <https://doi.org/10.3390/ijerph20085586>
- Ghosh, P., & Venkatachalapathy, N. (2014). Processing and drying of coffee - a review. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(12), 784-794.

- Gökmen, V., Kocadağlı, T., Göncüoğlu, N., & Mogol, B. A. (2012). Model studies on the role of 5-hydroxymethyl-2-furfural in acrylamide formation from asparagine. *Food Chemistry*, 132(1), 168-174. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.10.048>
- Gökmen, V., Palazoğlu, T.K., & Şenyuva, H.Z. (2006). Relation between the acrylamide formation and time-temperature history of surface and core regions of French fries. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 972-976. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.030>
- Hamzalıoğlu, A., & Gökmen, V. (2020). 5-Hydroxymethylfurfural accumulation plays a critical role on acrylamide formation in coffee during roasting as confirmed by multiresponse kinetic modelling. *Food Chemistry*, 318, 126467. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.126467>
- Knight, M., McWilliam, S., Peck, S., Koutsidis, G., Chope, G., Puddephat, I., & Wedzicha, B. (2021). Kinetic modelling of acrylamide formation during the frying of potato chips. *Food Chemistry*, 352, 129305. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129305>
- Kocadağlı, T., & Gökmen, V. (2019). Caramelization in foods: a food quality and safety perspective. In: Melton, L., Shahidi, F. & Varelis, P. (Eds.). *Encyclopedia of Food Chemistry* (pp. 18-29), Elsevier, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21630-2>
- Long, Y., Zhu, M., Ma, Y., Huang, Y., Gan, B., Yu, Q., Xie, J., & Chen, Y. (2023). Variation of bioactive compounds and 5-hydroxymethyl furfural in coffee beans during the roasting process using kinetics approach. *Food Chemistry Advances*, 2, 100242. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100242>
- Ma, Y., Long, Y., Li, F., Zhang, Y., Gan, B., Yu, Q., Xie, J. & Chen, Y. (2022). Exploring acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural formation in glucose-asparagine-linoleic acid system with a kinetic model approach. *Frontiers in Nutrition*, 9, 940202. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.940202>
- Mesías, M., & Morales, F. J. (2016). Acrylamide in coffee: Estimation of exposure from vending machines. *Journal of Food Composition and Analysis*, 48, 8-12. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.02.005>
- Moon, J. K., & Shibamoto, T. (2010). Formation of volatile chemicals from thermal degradation of less volatile coffee components: Quinic acid, caffeic acid, and chlorogenic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(9), 5465-5470. <https://doi.org/10.1021/jf1005148>
- Murkovic, M., & Bornik, M.A. (2007). Formation of 5-hydroxymethyl-2-furfural (HMF) and 5-hydroxymethylfurfural-2-furoic acid during roasting of coffee. *Molecular Nutrition and Food Research*, 51(4), 390-394. <https://doi.org/10.1002/mnfr.200600251>

- Nogaim, Q.A., Al-Duais, M., Al-Warafi, A., Al-Erianee, H., & Al-Sayadi, M. (2013). The chemical composition of Yemeni green coffee. *Journal of Food Chemistry and Nutrition*, 1(2), 42-48.
- 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>
- Pedreschi, F., & Mariotti, M. S. (2023). Production of contaminants during thermal processing in both industrial and home preparation of foods. En: Knowles, M.E., Anelich, L.E., Alan R. Boobis, A.R., & Popping, B. (Eds). *Present Knowledge in Food Safety: A Risk-Based Approach through the Food Chain* (pp. 211-217). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819470-6.00036-6>
- Rief, V., Felske, C., Scharinger, A., Krumbügel, K., Stegmüller, S., Breitling-Utzmann, C.M., & Lachenmeier, D.W. (2021). Indirect nuclear magnetic resonance (NMR) spectroscopic determination of acrylamide in coffee using partial least squares (PLS) regression. *Beverages*, 7(2), 31. <https://doi.org/10.3390/beverages7020031>
- Scholz, M. B. dos S., Prudencio, S.H., Kitzberger, C.S.G., & da Silva, .S. dos, (2019). Physico-chemical characteristics and sensory attributes of coffee beans submitted to two post-harvest processes. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 13(1), 831-839. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9995-x>
- Şen, D., & Gökmen, V. (2023). Multiresponse kinetic modeling of acrylamide formation in low moisture food systems like nuts and seeds during roasting. *ACS Food Science & Technology*, 3(9), 1606-1616. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.3c00359>
- Starowicz, M., & Zieliński, H. (2019). How Maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? *Food Reviews International*, 35(8), 707-725. <https://doi.org/10.1080/87559129.2019.1600538>
- Tamanna, N., & Mahmood, N. (2015). Food processing and maillard reaction products: Effect on human health and nutrition. *International Journal of Food Science*, 2015, 526762. <https://doi.org/10.1155/2015/526762>
- Wnorowski, A., & Yaylayan, V.A. (2000). Influence of pyrolytic and aqueous-phase reactions on the mechanism of formation of maillard products. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), 3549-3554. <https://doi.org/10.1021/jf9913099>
- Yaylayan, V.A., & Keyhani, A. (2000). Origin of carbohydrate degradation products in L-alanine/D- [13C]glucose model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(6), 2415-2419. <https://doi.org/10.1021/jf000004n>

- Zhu, M., Long, Y., Ma, Y., Chen, Y., Yu, Q., Xie, J., Li, B., & Tian, J. (2021). Comparison of chemical and fatty acid composition of green coffee bean (*Coffea arabica* L.) from different geographical origins. *LWT*, 140, 110802. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110802>
- Zhu, M., Long, Y., Ma, Y., Huang, Y., Wan, Y., Yu, Q., Xie, J., & Chen, Y. (2022). Investigation of thermal contaminants in coffee beans induced by roasting: A kinetic modeling approach. *Food Chemistry*, 378, 132063. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132063>

Capítulo 5

Metodologías de mitigación de compuestos de neoformados

Mitigation methodologies for neoformed compounds

Resumen

En este capítulo se desarrollan las estrategias de mitigación aplicadas a productos como el café y el cacao. En primer lugar, se destaca la importancia de reducir la formación de estos compuestos debido a su relación con la salud pública y con la calidad del producto. Asimismo, se describen los principales compuestos que representan un riesgo para la salud asociados al consumo de café y cacao, junto con las estrategias de mitigación implementadas por la industria alimentaria.

Posteriormente, se analiza la etapa de producción, abordando el control de la materia prima y los métodos de cultivo. En este contexto, se considera la selección de variedades de café y cacao según su influencia en la formación de compuestos neoformados, así como las prácticas agrícolas que afectan la composición química de los granos.

A continuación, se plantean modificaciones en el proceso de tostado del café y del cacao incluyendo ajustes en la temperatura y el tiempo, además del empleo de métodos alternativos de tostado como el tostado al vacío y el uso de atmósferas modificadas.

Además, se analiza el uso de inhibidores y aditivos para la reducción de compuestos neoformados, mediante la incorporación de aditivos naturales y compuestos inhibidores. También se examina el papel de los antioxidantes naturales y se evalúa la eficacia de diferentes inhibidores, así como sus efectos sobre el sabor y la calidad del producto.

Posteriormente, se abordarán los métodos de postratamiento posteriores al tostado, así como el impacto sensorial y la aceptabilidad del consumidor frente a los productos sometidos a estrategias de mitigación.

Finalmente, se presenta un estudio de caso sobre una estrategia de mitigación mediante la inoculación de un cultivo iniciador de *S. cerevisiae* en la fermentación de café y cacao producidos en el departamento del Huila, Colombia. En este estudio se evalúa el efecto de esta metodología en las características sensoriales mediante la valoración realizada por expertos y consumidores.

Palabras clave: *mitigación, compuestos neoformados, análisis sensorial, microorganismos, fermentación.*

Abstract

This chapter presents mitigation strategies applied to products such as coffee and cocoa. First, it highlights the importance of reducing the formation of these compounds due to their impact on public health and product quality. In addition, it identifies the main compounds that pose health risks associated with the consumption of coffee and cocoa, together with the mitigation strategies implemented by the food industry.

The analysis begins with the production stage, addressing raw material control and cultivation practices. Specifically, it examines the selection of coffee and cocoa varieties according to their influence on the formation of neoformed compounds, as well as agricultural practices that affect the chemical composition of the beans. Subsequently, modifications to the roasting process of coffee and cocoa are discussed, including adjustments to temperature and roasting time, as well as alternative roasting methods such as vacuum roasting and modified-atmosphere roasting.

Furthermore, the chapter examines the use of natural additives and inhibitory compounds to reduce neoformed compounds. It also discusses the role of natural antioxidants and evaluates the effectiveness of different inhibitors, together with their effects on flavor and product quality.

Subsequently, post-roasting treatments, their sensory impact, and consumer acceptance of products subjected to these mitigation strategies are discussed. Finally, the chapter presents a case study of a mitigation strategy based on the inoculation of a *Saccharomyces cerevisiae* starter culture during the fermentation of coffee and cocoa produced in the Department of Huila, Colombia. The

study evaluates the effect of this methodology on the sensory characteristics of the products through assessments conducted by both expert panelists and consumers.

Keywords: *mitigation, neoformed compounds, sensory analysis, microorganisms, fermentation.*

Introducción

Los compuestos neoformados (NFC) se generan principalmente durante procesos térmicos como el secado, la fermentación y el tostado de productos como el café y el cacao, los cuales contienen carbohidratos, azúcares reductores, proteínas, péptidos, aminoácidos (como la asparagina y la alanina) y carbohidratos considerados precursores de NFC (da Costa et al., 2023).

En la etapa de secado es recomendable manejar temperaturas moderadas y evitar la exposición prolongada a temperaturas intermedias que puedan favorecer la formación de compuestos como el hidroximetilfurfural (HMF) (Medina-Orjuela et al., 2024).

En el proceso de tostado se dan principalmente las reacciones de Maillard y descomposición de azúcares y lípidos, responsables tanto de la formación de aromas deseables como de contaminantes de importancia toxicológica (Schouten et al., 2020); la formación de los NFC depende del tiempo y de la temperatura. En ciertos rangos puede reducir acrilamida porque esta se forma en etapas tempranas, se degrada con tiempos y temperaturas posteriores; sin embargo, surgen otros compuestos aromáticos como HMF. Así, los tostados largos y suaves pueden elevar algunos NFC (Barrios-Rodríguez et al., 2022).

Todos los estadios del proceso como la selección de la materia prima, el tostado, el almacenamiento y las condiciones de elaboración de la bebida influyen en los niveles de acrilamida en el café y el cacao. En el café, la bebida constituye una de las mayores fuentes dietarias de acrilamida (Schouten et al., 2020).

El cacao y sus derivados a menudo presentan menores niveles de acrilamida en comparación con los productos horneados o sometidos a calor, debido a que la matriz del cacao es compleja por su elevado contenido de extracto etéreo y proteínas. De hecho, los mismos precursores pueden interferir dando lugar a mediciones sobreestimadas (Gil et al., 2022).

Tanto la calidad del material de origen como las condiciones de procesamiento y almacenamiento influyen directamente en los niveles de NFC presentes en el

café y el cacao. Dado que los NFC se han asociado con efectos adversos para la salud, son objeto de preocupación toxicológica y de control regulatorio (Schouten et al., 2020).

Importancia de reducir compuestos neoformados por razones de salud pública y calidad del producto

El café, con un consumo mundial estimado en 170,3 millones de sacos (ICO, 2022), es ampliamente apreciado por sus características sensoriales y por su composición bioactiva como los polifenoles de importancia en la prevención de enfermedades (da Costa et al., 2023). No obstante, el tostado responsable de las características aromáticas y sensoriales deseables en el café y el cacao producen NFC, como acrilamida, HMF, furano y alcohol furfurílico, asociados a efectos mutagénicos, genotóxicos y carcinogénicos (Capuano & Fogliano, 2011; Göncüoğlu et al., 2022; da Costa et al., 2023); su presencia se constituye una alarma para la seguridad alimentaria (Kumari et al., 2025). Futuros estudios deberían estandarizar el sistema de detección de NFC, desarrollo de máquinas de procesamiento y la optimización de nuevas tecnologías para garantizar productos de cacao y café seguros y de alta calidad (Nongmaithem et al., 2025).

Principales compuestos de preocupación en cacao y café: acrilamida, furanos, PAHs, etc.

Durante el tostado, los granos de café y cacao generan múltiples compuestos derivados de la reacción de Maillard o pardeamiento no enzimático, la pirolisis y la caramelización. Si bien algunos de ellos contribuyen al aroma, al color y al sabor, otros representan riesgos para la salud. Entre los más relevantes se encuentran la acrilamida, el furano, los PAHs, los α -dicarbonilos, los productos finales de glicación avanzada y los cloropropanoles; considerados compuestos tóxicos asociados a efectos neurotóxicos, carcinogénicos y genotóxicos.

En cacao, las reacciones térmicas originan una amplia variedad de compuestos volátiles (tiazoles, pirazinas, oxazoles, pirroles), así como melanoidinas responsables del color y la actividad antioxidante. La formación de HMF depende del contenido inicial de azúcares como la glucosa y la fructosa, los cuales pueden transformarse por rutas específicas de la reacción de Maillard (Zapata-Bustamante et al., 2015).

En café, incluso en muestras con baja concentración de acrilamida, pueden detectarse el furano y el alcohol furfurílico, ambos clasificados por la IARC como posiblemente carcinogénicos (Grupo 2B) (Schouten et al., 2020).

El contenido de azúcares como la fructosa y la glucosa disminuye sus niveles después del tostado y tienen un efecto negativo sobre el contenido de antocianinas. La velocidad de degradación es asociada a la velocidad a la cual el azúcar es convertido en compuestos tipo furfural, como el 5-hidroxiacetilfurfural (HMF) (Markakis et al., 1957); estos compuestos son producidos por las reacciones de Maillard durante el tostado de los granos. Además, las altas temperaturas utilizadas en el proceso de tostado afectan el contenido de antocianinas, causando una pérdida del azúcar glicosilante en la posición 3 de la molécula y una apertura del anillo con la consecuente producción de chalconas incoloras (Timberlake, 1980; Zapata-Bustamante et al., 2015). Un factor que puede interferir en el contenido de azúcares disponibles es la alta concentración de polifenoles durante el proceso de tostado, la cual reduce las degradaciones de aminoácidos libres y azúcares reductores; y, por ende, la formación de productos de las reacciones de Maillard como pirazinas (Misnawi et al., 2004; Zapata-Bustamante et al., 2015).

Se ha encontrado la presencia de compuestos tóxicos como el alcohol furfurílico, furano y el 5-hidroxiacetilfurfural (HMF), en muestras de café con bajos contenidos de acrilamida. El furano y el alcohol furfurílico son otros contaminantes inducidos por el calor clasificados por la IARC como posiblemente carcinogénicos para los humanos, pertenecientes al grupo 2B. En cuanto al HMF, algunos estudios en animales destacaron su actividad tóxica, pero este compuesto aún no ha sido clasificado por la IARC como carcinogénico (Schouten et al., 2020).

Estrategias generales de mitigación en la industria alimentaria

Dadas estas implicaciones, es fundamental investigar alternativas de mitigación que permitan reducir la formación de contaminantes sin comprometer la calidad sensorial del café. Estrategias basadas en química verde, como la inoculación de levaduras durante la fermentación, permiten intervenir desde las etapas tempranas sobre los precursores responsables de la formación de NFC. Además, es necesario dar cumplimiento a los límites de ingesta permisibles propuestos por las entidades de seguridad alimentaria como la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) y la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (USFDA) encargadas de supervisar estos contaminantes de proceso (NFC) en los alimentos como el café y el cacao (Schouten et al., 2020).

Control de Materia Prima y Métodos de Cultivo

Uno de los puntos de control está en la selección variedades con menor predisposición a acumular precursores de NFC como la acrilamida (Schouten et al., 2020). Factores agronómicos como la variedad, la madurez del fruto, la

genética, las prácticas de fertilización y las condiciones de almacenamiento influyen directamente en el contenido de azúcares reductores y aminoácidos como la asparagina. Además, el procesamiento poscosecha va a influir en la generación de estos NFC.

Según Peña-Correa et al. (2024) los azúcares en los granos de cacao fermentados y sin tostar no son uniformes y su contenido no parece tener relación con la variedad. En el estudio sobre la fertilización con nitrógeno en cultivo de papa, esta no presentó influencia en la formación de acrilamida (Amrein et al., 2003).

Selección de variedades de cacao y café con menor predisposición a formar compuestos neoformados

En los factores agronómicos es necesario revisar: *i)* las variedades de la materia prima, *ii)* los niveles de precursores de acrilamida y otros NFC, y *iii)* las condiciones de almacenamiento poscosecha (Kumari et al., 2025).

En café, existen diferencias marcadas entre *C. arábica* y *C. canephora* (Robusta). *Arabica* presenta mayor sacarosa y menor asparagina, mientras que *Robusta* acumula más azúcares reductores y aminoácidos libres, lo que incrementa la formación de acrilamida. La vía húmeda, común en *Arabica*, reduce significativamente los azúcares, mientras que la vía seca, típica de *Robusta*, los conserva en mayor proporción. En el café verde la glucosa, la sacarosa y los ácidos grasos poliinsaturados, específicamente los ácidos linoleico y linolénico, son posibles precursores de la formación de furano en el café tostado (Doblado-Mendoza, 2022). En cacao, la composición química y el potencial antioxidante dependen del clon y del manejo poscosecha, por lo que la selección de material vegetal constituye un factor crítico para la mitigación de NFC.

Cabe resaltar que existen factores internos y externos que afectan la calidad y/o cantidad de los compuestos fenólicos en las plantas, como la diversidad genética en cuanto a variedad y origen, la etapa de madurez, las variables ambientales como la intensidad de la luz, el clima, la temperatura, el uso de fertilizantes, el manejo de daños mecánicos como heridas, el método de extracción, el procesamiento y el almacenamiento (Vallejo et al., 2003; Niemenak et al., 2006; Schinella et al., 2010; Zapata-Bustamante et al., 2015). *Coffea arabica* tiene bajos niveles de cafeína y sólidos solubles en comparación con *Coffea canephora* (Silva da Costa et al., 2023). Cada una de las especies de café presenta diferencias en la composición y en las propiedades sensoriales y se ofrecen en el comercio por variedad o en mezclas según las preferencias de los consumidores. Las diferencias

en la composición química de estas especies se caracterizan por la diferente concentración de precursores de acrilamida como aminoácidos libres y azúcares reductores. Ambas especies contienen carbohidratos, pero *Arabica* tiene mayor proporción de azúcares como sacarosa en comparación con *Robusta*, esta última contiene más azúcares reductores como glucosa y fructosa. Además, en *Robusta* predominan aminoácidos libres como la asparagina y la alanina (Schouten et al., 2020).

En *Robusta* los altos niveles de asparagina y bajos en sacarosa están relacionados con altos niveles de acrilamida en comparación con *Arabica*. También en *Arabica* encontraron altos niveles de acrilamida a pesar de presentar menores contenidos de asparagina y altos contenidos de azúcares reductores. Es de resaltar la importancia de cosechar frutos de café y cacao maduros debido a que el procesamiento de frutos inmaduros tiene altos contenidos de asparagina libre, representando un riesgo en la generación de NFC como acrilamida (Schouten et al., 2020).

En cacao, el contenido de metabolitos secundarios y, por ende, el potencial antioxidante de los granos de cacao depende del clon utilizado (Zapata-Bustamante et al., 2015). La selección de la materia prima es clave en cuanto a la variedad y las condiciones de cultivo dado que tienen relación con el contenido de precursores como la asparagina y los azúcares reductores. En principio, se optaría por escoger materia prima con menor contenido de precursores; sin embargo, en caso contrario podría ser de interés en procesos de fermentación mediante inoculación de levaduras, bacterias ácido-lácticas o el uso de enzimas como la asparaginasa. Además, procesar muestras con madurez homogénea contribuye a reducir la variabilidad de los precursores (Schouten et al., 2020).

Prácticas agrícolas que afectan la composición química de los granos

Las prácticas de fertilización, especialmente el uso de potasio, pueden modificar los niveles de azúcares, ácidos clorogénicos y fenoles, que posteriormente influirán en la formación de compuestos contaminantes durante el tostado (Cao et al., 2023).

Modificaciones en el proceso de tostado de cacao y café

El tostado es la etapa clave en la formación de compuestos aromáticos y pigmentos característicos del café y el cacao. Sin embargo, también es la fase donde se producen la mayoría de los NFC. Las principales rutas de formación: i) HMF: derivado de hexosas a través de la reacción de Amadori (ARP) o de

la caramelización, *ii*) Acrilamida: generada principalmente por la reacción de asparagina con azúcares reductores, *iii*) Furanos y FFA: formados por la descomposición de carbohidratos y ácidos grasos poliinsaturados.

La formación de compuestos químicos responsables de los atributos sensoriales como sabor, aroma y color, ocurre en la tostación, responsable de las transformaciones químicas como la pirolisis, la reacción de Maillard y la caramelización, que forman sabores, aromas y pigmentos característicos del producto. En la tostación del café se han identificado alrededor de 1.000 compuestos químicos volátiles, de los cuales 300 son compuestos orgánicos heterocíclicos, entre los que se encuentran tiazoles, imidazoles, furanos y pirazinas (da Costa et al., 2023).

La reacción de Maillard es crucial para la formación de características deseables en el café. Ocurre entre un grupo carbonilo perteneciente a los azúcares reductores (glucosa y fructosa) y un grupo amino presente en aminoácidos, amidas, proteínas y péptidos. Esta reacción produce una base de Schiff y una glicosilamina N-sustituida, que luego, debido a su naturaleza inestable, experimenta una isomerización, generando 1-amino-1-desoxicetosa o 2-amino-2-desoxialdosa. En conjunto, estas reacciones contribuyen significativamente a la creación del sabor distintivo y las propiedades físicas del café tostado. Los compuestos resultantes de la reacción de Amadori (ARP), en la etapa intermedia de la reacción de Maillard del café, pueden seguir diferentes rutas de reacción según la concentración original de azúcares reductores y las condiciones de pH. Estos compuestos contribuyen a la formación de moléculas aromáticas como oxazoles, tiazoles, pirroles e imidazoles, así como a la generación de compuestos no deseados (NFC) como la acrilamida, el furano, los ácidos grasos libres y el 5-hydroxymethylfurfural (HMF) (Schenker & Rothgeb, 2017).

En el caso del HMF, se forma a partir de la reacción de Amadori (ARP) de la glucosa durante la reacción de Maillard, especialmente a pH neutro o en condiciones ácidas. La base de Schiff del HMF se genera mediante un mecanismo de enolización 1,2 o 1,3, seguido de la eliminación de un compuesto amino y la adición de una molécula de agua. La sacarosa también puede dividirse en monosacáridos, contribuyendo a la formación de HMF durante el tostado. La caramelización de azúcares, que ocurre simultáneamente con la reacción de Maillard, también juega un papel clave en la generación de HMF. Además, la glucosa o la fructosa pueden sufrir una enolización 1,2 y deshidratación a pH bajo, formando 3-desoxiosona, un intermediario clave en la formación de HMF (Locas & Yaylayan, 2008).

La formación de acrilamida se atribuye principalmente a la reacción de Maillard. La asparagina es el reactivo limitante en esta vía. Otros posibles mecanismos incluyen la descarboxilación de acroleína, ácido acrílico y asparagina. Además, se considera que el HMF generado durante el tostado podría contribuir a la formación de acrilamida al reaccionar con la asparagina en la reacción de Maillard (Granvogl et al., 2004; Schouten *et al.*, 2020).

La formación de FFA se origina a partir de la pirólisis de la glucosa, donde la oxidación de los carbonos C1 y C6 produce ácido glucónico y ácido glucurónico, que luego se descarboxilan para dar lugar a los ácidos grasos libres. Otras vías incluyen la escisión del retro-aldólica de la 1-desoxi-1-amino-3-hexulosa y la degradación térmica de los polifenoles presentes en el café. La pirólisis de aminoácidos como la serina también contribuye a la formación de ácidos grasos libres (Moon & Shibamoto, 2010).

La formación de furanos involucra la termodegradación de aminoácidos, carbohidratos y la oxidación de ácidos grasos poliinsaturados. La pirólisis de aminoácidos como la serina produce acetaldehído y glicol aldehído, que forman furano a través de la condensación aldólica. La descomposición de la sacarosa en hexosas durante la reacción de Maillard y la pirólisis contribuye a la formación de furanos, donde a pH ácido se forma 3-desoxiosona y a pH neutro se forma 1-desoxiosona. Además, la autooxidación de ácidos grasos mono y diinsaturados contribuye a la formación de furanos.

En cacao no es posible establecer un efecto general del tostado sobre el contenido de metabolitos secundarios y la actividad antioxidante de los granos, ya que los clones presentan diferencias. Sin embargo, el contenido de compuestos fenólicos y los productos de las reacciones de Maillard pueden contribuir significativamente a la capacidad antioxidante y finalmente sobre las características organolépticas finales de los granos de cacao tostados (Zapata-Bustamante et al., 2015). Los oligosacáridos parecen mantenerse estables después del tostado (Peña-Correa et al., 2024).

Cuando aumentan el tiempo y la temperatura de tostado de los granos de cacao, la concentración de azúcares se reduce significativamente. La fructosa es la más afectada, luego la glucosa y por último la sacarosa. La glucosa y la fructosa son azúcares reductores que participan en la reacción con una fuente de amina, en el caso de la sacarosa esta requiere primero ser hidrolizada en glucosa y fructosa. La disminución más pronunciada de la fructosa en comparación con

la glucosa se debe a que la orientación del grupo hidroxilo en las posiciones C3 y C4 de la fructosa le confiere una mayor reactividad. Los oligosacáridos parecen permanecer estables después del tostado. Las pérdidas de grasa durante el tostado difícilmente pueden atribuirse a la generación de productos neoformados derivados de lípidos. El contenido de aminoácidos libres decrece significativamente con el tiempo y la temperatura del tostado, el porcentaje de reducción de los aminoácidos totales está entre el 25 y el 50% (Peña-Correa et al., 2024). En el estudio realizado por Zzaman et al. (2017) disminuyó la cantidad de ácido glutámico, tirosina, glicina e histidina; mientras que en la investigación de Brito et al. (2000) se encontró que los aminoácidos más afectados fueron la histidina, la cisteína y la onina. Es de resaltar que la composición de los granos de cacao varía entre las variedades, el origen, las actividades de cosecha, fermentación y secado.

Ajustes de temperatura y tiempo de tostado para minimizar la formación de compuestos peligrosos

En la tostación es posible realizar ajustes de temperatura y tiempo. Se ha encontrado que los niveles máximos de acrilamida se presentan en tostaciones ligeras y medias. La acrilamida disminuye a altas temperaturas y tiempos prolongados. El HMF disminuye con tostaciones más oscuras y el furano aumenta con tostaciones intensas, pero puede reducirse usando temperaturas más bajas y tiempos más largos. El uso de perfiles de tostado cuidadosamente diseñados permite minimizar la formación de NFC, como la acrilamida sin perder calidad sensorial, lo cual ha sido ampliamente documentado como se describe a continuación: los ajustes en las condiciones de temperatura y tiempo durante el tostado del café constituyen una estrategia clave para minimizar la formación de compuestos neoformados potencialmente indeseables, como el 5-hidroximetilfurfural (5-HMF), el furano y la acrilamida, sin comprometer la calidad sensorial ni el contenido de compuestos bioactivos.

En el caso del 5-HMF, se ha evidenciado una relación directa con el grado de tostado y con la aplicación de procesos biotecnológicos previos, como la inoculación de microorganismos. Mayores grados de tostado generan menores contenidos de 5-HMF, con valores reportados de 415-471 mg kg⁻¹ en tostado bajo, 164-316 mg kg⁻¹ en tostado medio y 35-45 mg kg⁻¹ en tostado oscuro, lo cual se atribuye probablemente a un menor contenido de precursores disponibles en el café sometido a tostaciones más intensas. Adicionalmente, en muestras de tostado medio inoculadas con microorganismos se observó una mitigación del 34% en el contenido de 5-HMF. Aunque las muestras sometidas a tostado oscuro

sin inoculación presentaron la mayor capacidad antioxidante (IC_{50} : 4–5 g de café L^{-1}), se evidenció que temperaturas de tostación de 180 °C y 210 °C no influyeron significativamente en la formación de 5-HMF (Doblado-Mendoza, 2022).

Respecto al furano, se observó que su contenido aumenta con el grado de tostado, registrándose valores entre 5019 y 6507 $ng\ g^{-1}$ en café tostado medio y hasta 7916 $ng\ g^{-1}$ en tostado oscuro. No obstante, la aplicación de un proceso de inoculación microbiana permitió reducir el contenido de furano en aproximadamente un 14%. Contrariamente, otros estudios indican que el tostado a baja temperatura (140 °C) y tiempos prolongados (20 minutos) puede disminuir el contenido de furano en el producto final, lo que sugiere que su formación y degradación dependen de un delicado balance entre temperatura y tiempo de exposición térmica.

En cuanto a la acrilamida, diversos estudios coinciden en que su formación alcanza un máximo en etapas tempranas del tostado y posteriormente disminuye conforme se intensifica el proceso térmico. La menor cantidad de acrilamida se ha reportado a 260 °C durante 15 minutos. Al aplicar temperaturas de 150, 200 y 225 °C en intervalos de 5 a 30 minutos, se observó un incremento inicial de acrilamida, alcanzando picos máximos entre los primeros 5 y 10 minutos a 200 y 225 °C, seguido de una disminución exponencial. Summa et al. (2007) reportaron que prolongar la tostación a 236 °C durante aproximadamente 4 minutos reduce la acrilamida en café *Arábica* y *Robusta*. De manera similar, Bagdonaite et al. (2008) evidenciaron que al incrementar los tiempos de tostación de 5 a 15 minutos y las temperaturas de 220 a 260 °C, la velocidad de degradación de acrilamida aumenta, llegando incluso a no detectarse tras 15 minutos de tostado. Otros autores muestran reducciones significativas de acrilamida bajo condiciones de tostado moderado a intenso, manteniendo una adecuada calidad sensorial y una degradación controlada de polifenoles (Alves et al., 2010; Budryn et al., 2015).

El decrecimiento de la acrilamida durante la tostación se atribuye principalmente a su interacción química con las melanoidinas del café, cuyos grupos amino nucleofílicos pueden reaccionar con la acrilamida mediante una reacción de adición de Michael. En este sentido, los niveles máximos de acrilamida se encuentran generalmente en tostaciones ligeras y medias, disminuyendo a medida que avanza el grado de tostado (Schouten et al., 2020).

En conjunto, la evidencia sugiere que un café procesado bajo parámetros de tostado medio, a una temperatura cercana a 210 °C, combinado con la aplicación de microorganismos como la levadura *Candida krusei* durante la fermentación,

constituye una alternativa tecnológica viable para la mitigación simultánea de 5-HMF y furano, sin afectar negativamente los compuestos bioactivos ni las características sensoriales del producto final (Doblado-Mendoza, 2022).

Los rangos de temperatura en cacao no son tan altos como en el tostado de café (180 °C-280 °C) o la cocción de masa (180 °C-250 °C) (Peña-Correa et al., 2024). Las técnicas de tostación y las temperaturas en nibs de cacao consideran horno convectivo y tostadora de lecho fluidizado en rangos de 110 °C-140 °C, horno convectivo capaz de cambiar velocidad del flujo de aire y la humedad relativa con temperaturas de 135 °C -150 °C, y horno de vapor sobrecalentado (150 °C-250 °C) (Peña-Correa et al., 2024). La calidad superior del cacao de Costa de Marfil presentó altos niveles de pirazinas con baja concentración de acrilamida (0,32 mg/100 g) en tostaciones a 116 °C durante 23 minutos (Farah, et al., 2012).

Métodos alternativos de tostado (tostado al vacío, tostado con atmósferas modificadas, etc.).

Dentro de las estrategias tecnológicas orientadas a la reducción de compuestos neoformados en café y cacao, se han propuesto diversos métodos alternativos al tostado convencional. Entre los más relevantes se destacan: *i)* el tostado al vacío, capaz de reducir hasta un 50% el contenido de acrilamida; *ii)* el uso de dióxido de carbono supercrítico como tratamiento posterior al tostado para la extracción selectiva de contaminantes; *iii)* el tostado con vapor, el cual presenta limitaciones sensoriales; y *iv)* la aplicación de tratamientos térmicos específicos en etapas previas al proceso de tostación.

El tostado al vacío ha mostrado resultados promisorios en la mitigación tanto de acrilamida como de otros compuestos térmicamente inducidos. Quarta y Anese (2012) demostraron que la aplicación de un tratamiento al vacío a 60 °C en café previamente hidratado (actividad de agua de 0,7), bajo presiones de 2,7 y 13,3 kPa durante 15 y 120 minutos, respectivamente, permitió eliminar aproximadamente el 10% del 5-HMF (Doblado-Mendoza, 2022). De manera consistente, se ha publicado que el procesamiento de café bajo condiciones de vacío (0,15 kPa) y con un grado de tostación medio genera alrededor de un 50% menos de acrilamida en comparación con la tostación convencional. Este efecto se atribuye a que las bajas presiones dentro del horno impiden la acumulación de acrilamida, favoreciendo su arrastre durante el calentamiento. Cabe resaltar que las propiedades de color y las características sensoriales del café tostado al vacío fueron similares a las del café tostado de manera convencional (Anese et al., 2014). No obstante, la implementación industrial de esta tecnología requerirá

modificaciones en el diseño de las tostadoras para permitir la aplicación de vacío durante la etapa de tostación.

El interés en la reducción de acrilamida cobra especial relevancia considerando que el consumo de café contribuye de manera significativa a la ingesta total de este contaminante en la dieta, particularmente en países del norte de Europa, donde el consumo per cápita de café es elevado.

Por otra parte, se ha evidenciado que no solo el tostado, sino también los métodos de preparación de la bebida influyen en el contenido final de compuestos volátiles como el furano. En este sentido, se ha evidenciado que los métodos de infusión, cafetera moka y máquina de espresso permiten reducciones del 57%, 67,5% y 63,3% en el contenido de furano, respectivamente (Doblado-Mendoza, 2022), lo que se asocia a la volatilización de este compuesto durante la preparación de la bebida.

En relación con el tostado con vapor, Schenker et al. (2006) evaluaron la aplicación de tratamientos con vapor antes y durante el tueste, utilizando tanto un autoclave como un tostador giratorio equipado con inyección de vapor. Los resultados indicaron que estos tratamientos no afectaron significativamente los contenidos de acrilamida. Sin embargo, desde el punto de vista sensorial, el café presentó defectos asociados a una mayor acidez, menor intensidad de tostado y mayor amargor en comparación con el café tostado de manera convencional, lo que limita su aplicabilidad comercial.

Adicionalmente, Anese et al. (2014) aplicaron tostaciones a 200 °C bajo condiciones de baja presión, empleando un horno estático equipado con una bomba de vacío, logrando una reducción del 50% en el contenido de acrilamida. Las condiciones de baja presión generadas dentro del tostador ejercieron un efecto de arrastre que impidió la acumulación de este contaminante en el producto final. Asimismo, se ha propuesto el tostado de café verde bajo una atmósfera de vapor considerando tueste claro y oscuro, y se encontraron diferencias en los atributos del café tostado; es decir, el color y la densidad fueron más pronunciadas en cafés con tueste claro que en tueste oscuro. El café tratado con vapor sugiere que este tratamiento afecta el comportamiento del tueste mediante la extracción de algunos compuestos precursores del aroma (Baggenstoss et al., 2008).

En contraste, otros autores han propuesto el uso de dióxido de carbono supercrítico como una alternativa posterior al tostado. Banchemo et al. (2013)

sugieren esta tecnología a escala de laboratorio, reportando eficiencias de remoción de acrilamida entre el 8 y el 45% cuando el tiempo de extracción fue inferior a 8,8 horas, y hasta un 79% tras 21,8 horas de tratamiento con el fluido supercrítico. La extracción con dióxido de carbono supercrítico se reconoce como un método limpio y eficiente para el procesamiento de matrices alimentarias sólidas. Esta tecnología presenta aplicaciones tanto para la recuperación de compuestos bioactivos de interés, como sabores, colorantes y otras biomoléculas, como para la eliminación de compuestos indeseables, incluyendo toxinas, neocontaminantes y pesticidas. El dióxido de carbono es el fluido supercrítico más utilizado debido a su bajo costo, carácter no inflamable, no tóxico y a su punto crítico relativamente bajo ($T_c = 31,1\text{ }^{\circ}\text{C}$; $P_c = 7,37\text{ MPa}$). En estado supercrítico, el dióxido de carbono presenta una viscosidad similar a la de un gas, alta difusividad y una densidad comparable a la de un líquido, lo que le confiere una capacidad de disolución ajustable mediante cambios en la temperatura y la presión. Además, la eliminación del disolvente se logra fácilmente mediante un proceso de expansión hasta presión atmosférica, permitiendo la recuperación del extracto sin residuos (Banchero et al., 2013).

En la tostación de cacao los granos se deshidratan, se reduce la carga microbiana, disminuye la acidez, el amargor y la astringencia. El estudio de Krysiak (2011) consideró el tostado de granos de cacao con microondas a 700 W, durante 12,5 min, generando una reducción en la acidez total y volátil de los nibs de cacao, y menores pérdidas de manteca de cacao hacia las cáscaras, en comparación con el cacao tostado por el método de convección. Se sugiere el uso de microondas como técnica de tostado a diferentes niveles de potencia (Peña-Correa et al., 2024). Estudios sobre cacao proponen la tostación en vacío para favorecer la conservación de flavonoides y modificar la cinética de la reacción de Maillard (Tamrin et al., 2012). Los estudios de Zzaman & Sifat (2023) sobre el tostado de cacao a $184\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 16 minutos en un horno de vapor sobrecalentado utilizando el modo de vapor sobrecalentado, preservaron significativamente las propiedades antioxidantes en comparación con el método convencional de tostado. Este tratamiento de inyección de vapor no siempre reduce la acrilamida, pero si genera cambios sensoriales como mayor acidez, o un sabor más amargo (Zzaman & Sifat, 2023). El tostado al vacío y el vapor sobrecalentado son alternativas para reducir la acrilamida y conservar los compuestos fenólicos en cacao; sin embargo, es clave evaluar el efecto en las propiedades sensoriales del producto (Tamrin et al., 2012).

Uso de inhibidores y aditivos para la reducción de compuestos neoformados

De acuerdo con lo publicado por Zamora & Hidalgo (2008) los antioxidantes no tienen efecto significativo en la formación de acrilamida. Sin embargo, se ha sugerido que los antioxidantes cuentan con una función positiva en la protección de los alimentos, la cual puede estar relacionada con la inhibición de la contribución de los productos de oxidación lipídica a la formación de acrilamida. Los lípidos tanto no oxidados como oxidados pueden contribuir a la conversión de asparagina en acrilamida, pero los lípidos no oxidados necesitan oxidarse como paso preliminar. Esta oxidación que ocurre en la reacción de Maillard se puede evitar con el uso de antioxidantes presentes en el café y el cacao.

Aditivos naturales y compuestos inhibidores que reducen la formación de compuestos durante el tostado

La mitigación de compuestos neoformados, tales como acrilamida, 5-hidroxitilfurfural (5-HMF) y furano, durante el tostado de café y cacao ha sido abordada mediante la aplicación de pre-tratamientos con aditivos químicos, biológicos y enzimáticos, así como mediante su combinación con tecnologías emergentes. Estas estrategias actúan principalmente sobre los precursores de la reacción de Maillard, modificando su disponibilidad, las condiciones fisicoquímicas del sistema o las rutas de reacción.

Diversos estudios han reportado el uso de aminoácidos, ácidos orgánicos, sales minerales, cloruro de calcio y enzimas, aplicados de manera individual o combinada con tecnologías como los campos eléctricos pulsados, con el fin de reducir la formación de compuestos neoformados durante el procesamiento térmico (Pavesi-Arisseto et al., 2011; Petisca et al., 2013). Estos aditivos pueden actuar mediante la complejación de precursores, la modificación del pH o la inhibición directa de intermediarios reactivos.

En sistemas modelo de café, Albouchi & Murkovic (2020) evaluaron 14 agentes de mitigación, evidenciando que el sulfito de sodio presentó una capacidad de mitigación del 38,3% para el 5-HMF. Este efecto se atribuye a que el 5-HMF es un aldehído susceptible a reacciones de reducción y el sulfito de sodio actúa como un agente reductor fuerte. Adicionalmente, se ha sugerido que estas tecnologías resultan más eficaces en grados de tostado oscuro, donde la disponibilidad de precursores es menor (Doblado-Mendoza, 2022).

Uso de microorganismos como estrategia de mitigación indirecta

El empleo de microorganismos ha cobrado relevancia como estrategia indirecta para reducir la formación de compuestos neoformados, al modificar la composición

química del sustrato antes del tostado. Se ha indicado que *Lactobacillus casei* Shirota reduce el contenido de acrilamida entre un 26 y un 73%, debido a que estos microorganismos utilizan azúcares y aminoácidos como fuente de energía, disminuyen el pH del medio y generan condiciones desfavorables para la reacción de Maillard (Kumari et al., 2025).

Asimismo, los microorganismos *Aspergillus oryzae*, *Aspergillus niger* y *Escherichia coli* son reconocidos como fuentes de L-asparaginasa, una enzima considerada GRAS que cataliza la conversión de la asparagina en ácido aspártico, el cual no actúa como precursor de la acrilamida (Kumari et al., 2025). En café, la aplicación de fermentaciones controladas con levaduras como *Saccharomyces cerevisiae*, *Candida parapsilosis* y bacterias ácido-lácticas del género *Lactobacillus* ha demostrado mejorar la calidad de la fermentación y las características sensoriales del producto final, además de contribuir a la mitigación de compuestos neoformados (Alves et al., 2017; Anese et al., 2014). Akillioglu y Gökmen (2014) integraron el proceso de fermentación con *S. cerevisiae* en la producción de café instantáneo, logrando reducciones de 5-HMF del 75,7%, 93,6% y 99,2% en medios con 1%, 5% y 10% de sacarosa, respectivamente, tras 24 horas de fermentación. De manera complementaria, se ha mencionado que, en un grado de tostado medio, la inoculación con *Candida krusei* permitió mitigar el contenido de 5-HMF en un 34% y el de furano en un 14% (Doblado-Mendoza, 2022).

El uso de asparaginasa en café verde ha sido ampliamente estudiado como una estrategia eficaz para la reducción de acrilamida. Esta enzima cataliza la hidrólisis de la asparagina libre, generando ácido aspártico y amonio. Se ha mencionado que la aplicación de bajas dosis de asparaginasa reduce el contenido de asparagina entre un 70 y un 80%, lo que se traduce en disminuciones de acrilamida del 55 al 74% tras el tostado.

No obstante, el grano de café verde presenta una estructura densa e impermeable, lo que limita la difusión de la enzima. Por esta razón, se han propuesto diversos pre-tratamientos para facilitar el contacto entre la asparaginasa y la asparagina presente en el grano, incluyendo procesos de secado, hidratación, molienda, tratamiento con vapor, remojo en agua y la aplicación de presiones reducidas o aumentadas (Schouten et al., 2020). Adicionalmente, se han propuesto estrategias tecnológicas para mejorar la penetración de la enzima, tales como: i) la reducción del tamaño del grano para incrementar la superficie de contacto; ii) el tratamiento previo con enzimas hidrolíticas (hemicelulasas, celulasas y pectinasas) para degradar la estructura de la pared celular; y iii) el secado o

tratamiento a baja presión para abrir los poros de la semilla y facilitar la difusión de la solución enzimática (Navarini et al., 2012).

Los métodos de beneficio y pre-procesamiento también influyen en la formación de compuestos neoformados. En este sentido, se han propuesto los procesos de café lavado para permitir la remoción de impurezas y granos defectuosos, lo que incide en el perfil de compuestos volátiles, incluyendo derivados de furanos (Cao et al., 2023).

En cacao, se ha planteado la modificación del pH mediante alcalinización como una estrategia para reducir ciertos compuestos neoformados; sin embargo, este tratamiento puede incrementar otros contaminantes térmicos y generar alteraciones significativas en el color y el sabor del producto final, lo que limita su aplicabilidad industrial (Gil et al., 2022).

En conjunto, la evidencia científica indica que el uso de aditivos naturales, compuestos inhibidores, tratamientos enzimáticos y fermentaciones controladas constituye una estrategia efectiva para reducir la formación de compuestos neoformados en café y cacao. No obstante, su implementación industrial debe considerar aspectos como la penetración de los aditivos en la matriz sólida, el impacto sensorial, la compatibilidad con procesos tradicionales y las restricciones regulatorias. Por ello, estas estrategias deben integrarse de manera complementaria con el control del grado de tostado y las condiciones térmicas del proceso.

Evaluación de la eficacia de diferentes inhibidores y sus efectos sobre el sabor y la calidad del producto

A pesar del desarrollo de diversas estrategias orientadas a la mitigación de compuestos neoformados, particularmente la acrilamida, alcanzar un equilibrio entre la reducción efectiva de estos contaminantes y la preservación de las características organolépticas del producto final continúa representando un reto significativo para la industria alimentaria (Kumari et al., 2025). En este contexto, la evaluación integral de la eficacia de inhibidores debe considerar no solo su capacidad de mitigación, sino también su impacto sobre el perfil sensorial y la calidad global del producto.

La inoculación microbiana impacta en la calidad sensorial del café. Se ha evidenciado que la aplicación de estrategias biotecnológicas durante la poscosecha puede contribuir a la reducción de compuestos neoformados sin

afectar negativamente la calidad sensorial. La inoculación de *Candida krusei* durante la fermentación de café pergamino en un proceso semiseco no mostró efectos adversos sobre los atributos sensoriales de las muestras, tales como aroma, sabor, cuerpo y acidez. En contraste, el grado de tostado sí ejerció una influencia significativa, dado que durante esta etapa se desarrollan los compuestos aromáticos característicos del café asociados a las reacciones de Maillard y de Strecker (Doblado-Mendoza, 2022).

Estos resultados resaltan que la mitigación de compuestos neoformados mediante fermentaciones controladas puede implementarse sin comprometer la calidad sensorial, siempre que se mantenga un control adecuado del tostado.

El rol de la fermentación y los cultivos iniciadores en la calidad del cacao. La calidad sensorial del producto final está estrechamente ligada a los procesos fermentativos. Los principales precursores presentes en el grano incluyen alcaloides, polifenoles, proteínas y carbohidratos. Durante la fermentación, se reduce el contenido de compuestos responsables del amargor y la astringencia, principalmente mediante la oxidación de los polifenoles. En este proceso, la actividad metabólica de bacterias ácido-lácticas y acéticas resulta fundamental, junto con la acción de levaduras que transforman los azúcares del mucílago en etanol y en metabolitos secundarios, como 2-heptanol y linalool, los cuales contribuyen con notas herbáceas, florales y frutales al perfil sensorial del cacao.

Adicionalmente, las elevadas temperaturas alcanzadas durante la fermentación favorecen reacciones bioquímicas intracelulares en los granos, tales como la proteólisis y la generación de compuestos precursores del aroma. Posteriormente, durante las etapas de secado y tostado, estos precursores participan activamente en las reacciones de Maillard y de Strecker, intensificando las propiedades organolépticas del producto final. En este contexto, la implementación de cultivos iniciadores permite controlar y estandarizar las poblaciones microbianas, favoreciendo la formación de perfiles sensoriales específicos y mejorando la calidad, consistencia y valor comercial del cacao fermentado y de sus derivados (Hernández, 2025).

El uso de levaduras específicas repercute en la generación de perfiles sensoriales diferenciados. Se ha publicado que levaduras como *Saccharomyces cerevisiae*, *Kloeckera apiculata* y *Hanseniaspora uvarum* desempeñan un papel clave en la transformación de azúcares y en la síntesis de compuestos aromáticos, en algunos casos generando perfiles sensoriales más complejos que los obtenidos

con cultivos comerciales estandarizados. En particular, las levaduras nativas producen perfiles específicos de compuestos volátiles que aportan características sensoriales distintivas al cacao. En las últimas décadas, el número de ensayos con cultivos iniciadores de levaduras se ha incrementado significativamente, con la finalidad de obtener cacaos de alta calidad y chocolates con perfiles sensoriales superiores (Hernández, 2025).

La fermentación es una estrategia que contribuye a la mitigación de compuestos neoformados y la calidad sensorial. La etapa de fermentación en la poscosecha representa una oportunidad estratégica para integrar la mitigación de compuestos neoformados con la mejora sensorial. La incorporación de cultivos iniciadores de levaduras y bacterias ácido-lácticas permite metabolizar precursores clave, como azúcares reductores y asparagina, reduciendo así la formación de 5-HMF y acrilamida durante el tostado.

En este sentido, estudios realizados en café instantáneo con adición de sacarosa en diferentes proporciones (1 %, 5 % y 10 %), combinada con la inoculación de *Saccharomyces cerevisiae* (1-2 %), evidenciaron reducciones de 5-HMF del 75,7 %, 93,6 % y 99,2 %, respectivamente, tras 24 horas de fermentación. Asimismo, el contenido de acrilamida se redujo en aproximadamente un 70% luego de 48 horas de fermentación bajo estas condiciones (Akıllıoglu & Gökmen, 2014).

En conjunto, la evidencia indica que el uso de inhibidores biológicos, particularmente mediante fermentaciones controladas con cultivos iniciadores, constituye una estrategia eficaz para reducir la formación de compuestos neoformados sin comprometer las características sensoriales del café y el cacao. Sin embargo, la efectividad de estas estrategias depende del control integrado de la fermentación, el secado y el tostado. Por ello, la evaluación de la eficacia de los inhibidores debe abordarse considerando simultáneamente la seguridad química, la calidad sensorial y la viabilidad tecnológica del proceso.

Métodos post-tostado para la eliminación de compuestos neoformados

Además de las estrategias implementadas en las etapas previas al tostado, los métodos post-tostado, particularmente las condiciones de almacenamiento, desempeñan un papel relevante en la disminución del contenido de acrilamida en productos de café. Diversos estudios han demostrado que factores como el tiempo de almacenamiento, la temperatura y el tipo de envase influyen significativamente en la degradación o pérdida progresiva de contaminantes neoformados (NFC).

En este sentido, Andrzejewski et al. (2004) observaron pérdidas de acrilamida de entre el 40% y el 65% en café tostado luego de seis meses de almacenamiento en el paquete original abierto, mantenido a temperatura ambiente. Estos resultados sugieren que la exposición al oxígeno y el tiempo de almacenamiento favorecen la reducción del contenido de acrilamida en el producto final.

De manera similar, Delatour et al. (2004) encontraron pérdidas de acrilamida que oscilaron entre el 28% y el 66% en muestras de café tostado molido y café soluble, tras períodos de almacenamiento de siete y doce meses, respectivamente, en su envase original herméticamente cerrado. Estos hallazgos evidencian que, aun en condiciones de envasado cerrado, el almacenamiento prolongado puede contribuir a la disminución de la acrilamida, aunque puede afectar las características sensoriales del producto.

La temperatura de almacenamiento también ha sido identificada como un factor determinante. Se ha informado que el café tostado almacenado en su empaque original cerrado a temperaturas entre 10 y 12 °C presentó una reducción aproximada del 30% en el contenido de acrilamida. Asimismo, el almacenamiento de café tostado en grano tostado en recipientes cerrados a 60 °C condujo a una disminución similar, del 30%, lo que indica que temperaturas elevadas pueden acelerar procesos de degradación o transformación de este compuesto.

Por otra parte, el tipo de envasado influye en la cinética de reducción de la acrilamida. El café molido empacado al vacío durante tres meses mostró una reducción del 33% en el contenido de acrilamida, mientras que el almacenamiento bajo las mismas condiciones, pero a 18 °C, resultó en una reducción más moderada, cercana al 18%. Estos resultados sugieren que la combinación de una atmósfera reducida y condiciones térmicas específicas puede modular la estabilidad de la acrilamida durante el almacenamiento (Schouten et al., 2020).

En conjunto, la evidencia disponible indica que las estrategias de post-tostado, especialmente aquellas relacionadas con el almacenamiento, pueden contribuir de manera significativa a la reducción de la acrilamida en el café. No obstante, la efectividad de estas prácticas depende de la interacción entre múltiples variables, incluyendo el tiempo, la temperatura, el estado físico del producto (grano o molido) y el tipo de envase. Por tanto, estas estrategias deben considerarse como medidas complementarias dentro de un enfoque integral de mitigación de compuestos neoformados a lo largo de la cadena de procesamiento del café.

Impacto sensorial y aceptabilidad del consumidor en la mitigación de compuestos neoformados

Evaluación del impacto de las estrategias de mitigación en el perfil sensorial de cacao y café

La implementación de estrategias para la mitigación de compuestos neoformados, como la acrilamida, el 5-hidroximetilfurfural (5-HMF) y los furanos, plantea el desafío de mantener la calidad sensorial del producto final tanto en café como en cacao. Aunque ambos productos comparten la formación de estos compuestos durante el tostado, presentan diferencias significativas en su composición química y en los procesos poscosecha, lo que condiciona el impacto sensorial de las estrategias de mitigación aplicadas.

El café es un producto altamente valorado por sus atributos sensoriales, tales como el aroma, el sabor, el cuerpo y la acidez, así como por sus potenciales beneficios para la salud. Estos atributos dependen en gran medida del grado de tostado, de la composición química del grano y de los procesos tecnológicos aplicados durante su transformación.

En función del grado de tostado, se han descrito diferencias sensoriales marcadas. El café de tueste bajo se caracteriza por una acidez acentuada, un amargor reducido y un aroma y sabor suaves en comparación con otros grados de tostado, siendo especialmente adecuado para la preparación de café espresso. Por su parte, el café de tueste medio presenta una acidez más pronunciada que el de tueste bajo, mayor cuerpo y un perfil sensorial equilibrado, lo que lo hace idóneo para métodos de preparación por filtrado. En contraste, el café de tueste alto se distingue por una baja acidez, un cuerpo más ligero, mayor amargor y una bebida de color más oscuro, características asociadas a una mayor intensidad térmica durante el proceso de tostación (da Costa et al., 2023).

Desde el punto de vista composicional, el café contiene una amplia gama de compuestos bioactivos, siendo los polifenoles totales uno de los grupos más relevantes. Estos se encuentran en alta concentración en los granos verdes y confieren al café un potencial funcional asociado a la prevención de enfermedades cardiovasculares, del cáncer y de trastornos neurodegenerativos como la enfermedad de Alzheimer. Entre las principales sustancias bioactivas se destacan los ácidos clorogénicos, la trigonelina, los diterpenos y el cafestol (da Costa et al., 2023).

Las propiedades sensoriales del café, como el color, el aroma y el sabor, están determinadas por la interacción de diversos componentes químicos, incluyendo

proteínas, aminoácidos libres, polisacáridos, lípidos, trigonelina, ácidos clorogénicos y cafeína. Dentro de los aminoácidos libres, la alanina, la asparagina y la fenilalanina se encuentran entre los más abundantes y desempeñan un papel clave como precursores en la reacción de la Maillard durante el tostado, contribuyendo tanto a la formación de compuestos aromáticos como a la de contaminantes neoformados (da Costa et al., 2023).

En este contexto, recientemente se han propuesto estrategias de mitigación basadas en el uso de microorganismos y enzimas como alternativas seguras para reducir la formación de acrilamida sin comprometer la calidad sensorial del café. La eficacia de estas estrategias depende de factores como el tipo de cepa microbiana, la carga inoculada, el tiempo de incubación, el pH del medio y la disponibilidad de nutrientes (Kumari et al., 2025). Entre los mecanismos propuestos se incluye la capacidad de ciertas bacterias para adsorber acrilamida en su pared celular, así como el uso de hongos y levaduras que, mediante procesos fermentativos, reducen el pH, producen ácidos orgánicos y disminuyen la disponibilidad de precursores, inhibiendo la formación de este contaminante neoformado durante la reacción de Maillard.

Adicionalmente, el empleo de enzimas específicas, como la L-asparaginasa, ha demostrado ser una estrategia eficaz al catalizar la conversión de la asparagina libre en ácido aspártico, compuesto que no actúa como precursor de acrilamida. Asimismo, la acrilamidasa permite la transformación de la acrilamida en ácido acrílico, contribuyendo a su reducción en el producto final (Kumari et al., 2025). La implementación de estas estrategias debe considerar su impacto en la matriz del café, con el fin de preservar los compuestos responsables del aroma y el sabor característicos que determinan la aceptación del consumidor.

En el cacao, el desarrollo del perfil sensorial está fuertemente condicionado por la fermentación, etapa clave para la formación de precursores de aroma. Durante este proceso, se produce la degradación de compuestos responsables del amargor y la astringencia, principalmente de los polifenoles, mediante reacciones de oxidación. La actividad metabólica de levaduras, bacterias ácido-lácticas y bacterias acéticas transforma los azúcares del mucílago en etanol y metabolitos secundarios, como alcoholes y ésteres, que aportan notas herbáceas, florales y frutales al perfil sensorial del cacao (Hernández, 2025).

Las altas temperaturas alcanzadas durante la fermentación favorecen reacciones bioquímicas intracelulares, como la proteólisis, que conduce a la formación de

aminoácidos libres y péptidos, precursores esenciales del aroma. Posteriormente, durante el secado y el tostado, estos compuestos participan en las reacciones de Maillard y de Strecker, intensificando las características organolépticas del producto final. En este contexto, la implementación de cultivos iniciadores permite controlar y estandarizar los microorganismos presentes en la fermentación, favoreciendo perfiles sensoriales específicos, mejorando la calidad, la consistencia y el valor comercial del cacao y sus derivados (Hernández, 2025).

Desde la perspectiva de la mitigación de compuestos neoformados, la incorporación de cultivos iniciadores de levaduras y bacterias ácido-lácticas durante la fermentación del cacao puede contribuir a la reducción de precursores como los azúcares y la asparagina, sin comprometer el desarrollo sensorial. No obstante, estrategias como la alcalinización del cacao, aunque pueden reducir ciertos contaminantes, tienden a modificar el color y el sabor del producto, lo que limita su aceptación sensorial y su aplicación en productos de alta calidad.

En ambos casos, las estrategias de mitigación más prometedoras son aquellas que actúan sobre los precursores antes del tostado, como la fermentación controlada y el uso de enzimas, ya que permiten reducir la formación de contaminantes sin afectar negativamente el perfil sensorial. Por el contrario, las estrategias que implican modificaciones drásticas de las condiciones químicas o térmicas del proceso tienden a generar cambios sensoriales indeseables. La evidencia científica sugiere que la aplicación de estrategias biotecnológicas, basadas en el uso de microorganismos y enzimas, constituye una alternativa viable para la mitigación de compuestos neoformados en café y cacao, preservando o incluso mejorando las características sensoriales que determinan la calidad y la aceptación de estos productos.

Estudios de aceptación del consumidor y percepción del producto final

La evaluación de la aceptabilidad del consumidor constituye un componente fundamental en la validación de estrategias de mitigación de compuestos neoformados, dado que la reducción de contaminantes, como la acrilamida, no debe comprometer las características sensoriales que determinan la calidad percibida del producto final. En café y cacao, diversos estudios han integrado análisis químicos, sensoriales y pruebas de preferencia para valorar el impacto real de estas intervenciones tecnológicas.

En el café, los tratamientos térmicos suaves, como la aplicación de vapor, han mostrado una reducción moderada de acrilamida, aunque acompañada

de cambios en compuestos sensorialmente relevantes. El tratamiento con vapor aplicado a café pergamino seco permitió disminuir la acrilamida en un 18,4%; sin embargo, también se observó una reducción de ácidos clorogénicos (17,1%) y lactonas (26,7%) en muestras de café *arábica* de tueste medio, así como disminuciones entre el 13,9% y el 22% en café *canephora*. Estos cambios evidencian que, si bien el tratamiento es eficaz desde el punto de vista químico, puede afectar compuestos asociados al amargor, la acidez y el aroma del café (Vieira-Porto et al., 2024).

El uso de asparaginasa ha sido ampliamente estudiado como estrategia para reducir la acrilamida en café. Vieira-Porto et al. (2024) reportaron que la aplicación de asparaginasa en granos de *arábica* a concentraciones de 1000 y 3000 ASNU permitió reducir la acrilamida en un 32,5% y un 56%, respectivamente, mientras que en café *canephora* las reducciones alcanzaron valores entre el 59,4% y el 60,7%. No obstante, se observó que el incremento de la carga enzimática estuvo asociado a un aumento de la acidez. El análisis sensorial realizado por Q-graders y consumidores indicó un ligero incremento en la acidez, la eliminación de notas no deseadas presentes en las muestras control y un aumento en la intensidad de los descriptores sensoriales cuando se utilizó la dosis más alta de enzima (3000 ASNU), sin afectar negativamente la aceptabilidad global.

De manera complementaria, Xu (2018) evaluó la adición de asparaginasa a granos de café verde mediante un método combinado de vapor e inmersión, logrando reducciones de acrilamida entre el 40% y el 91% en el café tostado. Sin embargo, este tratamiento provocó la pérdida de precursores clave, como aminoácidos, sacarosa y glucosa, así como de la película plateada del grano. El análisis sensorial reveló diferencias significativas en 12 y 17 de 39 atributos sensoriales de los cafés de tueste ligero y medio, respectivamente, al comparar muestras tratadas y no tratadas. A pesar de estas diferencias, las pruebas de preferencia mostraron que ambas muestras presentaron niveles de aceptabilidad similares, sin detectarse sabores ni aromas desagradables asociados al tratamiento enzimático. La pérdida de la película plateada condujo a un tostado más oscuro, lo que explica las variaciones observadas en el perfil de compuestos volátiles y en las propiedades organolépticas del café. Intentos posteriores de aplicar la infusión al vacío para preservar la película plateada no fueron exitosos, ya que estas condiciones impidieron la adecuada penetración de la enzima en el grano.

Por otro lado, las estrategias basadas en fermentación dirigida también han sido evaluadas desde la perspectiva sensorial y de aceptación. Calderón et al. (2023)

fermentaron granos de café verde con cepas de levaduras de cerveza y vino, incluyendo *Saccharomyces cerevisiae* (Belgian Ale, Sourvisiae, 71B y Tropical IPA) y *Torulaspora delbrueckii*, durante 72 horas. Tras el secado y tostado, los perfiles sensoriales variaron en función de la cepa empleada, evidenciando la posibilidad de generar sabores novedosos mediante fermentación que se mantienen después del tostado. No obstante, la muestra de café sin inoculación obtuvo la mayor puntuación de agrado, lo que sugiere que, aunque la fermentación dirigida puede diversificar el perfil sensorial, la aceptación del consumidor depende de la familiaridad y expectativas asociadas al producto.

En el cacao, la fermentación es una etapa crítica para el desarrollo del perfil sensorial y la aceptación del producto final. El uso de cultivos iniciadores ha demostrado mejorar la eficiencia del proceso, reducir el tiempo de fermentación y aumentar la consistencia del sabor del chocolate. Campos et al. (2025) destacan la importancia de identificar nuevas cepas microbianas y optimizar las condiciones de fermentación, señalando que una mejor comprensión de la dinámica microbiana ofrece un alto potencial para mejorar la calidad del chocolate, la sostenibilidad del proceso y el desarrollo de perfiles de sabor específicos de cada región.

Adicionalmente, el control del tostado ha sido evaluado como una estrategia efectiva para mejorar la aceptabilidad sensorial del chocolate, especialmente en formulaciones con alto contenido de cacao. McClure et al. (2022) demostraron que la amargura, acidez y astringencia del chocolate al 100% pueden reducirse mediante la optimización del tiempo y la temperatura de tostado. Los perfiles óptimos identificados (20 minutos a 171 °C, 80 minutos a 135 °C y 54 minutos a 151 °C) condujeron a chocolates sin azúcar con mayor aceptación por parte de los consumidores, evidenciando que ajustes en el tostado pueden mejorar la percepción sensorial sin necesidad de aditivos.

En conjunto, las publicaciones evidencian que las estrategias de mitigación de compuestos neoformados pueden implementarse sin comprometer la aceptabilidad del consumidor, siempre que se optimicen las condiciones de proceso. En café, los tratamientos enzimáticos y fermentativos han mostrado reducciones significativas de acrilamida con impactos sensoriales variables, pero, en general, sin detrimento de la aceptación global. En cacao, la fermentación controlada y la optimización del tostado emergen como herramientas clave para mejorar la calidad sensorial y la preferencia del consumidor, al tiempo que ofrecen oportunidades para el desarrollo de perfiles de sabor diferenciados y de alto valor comercial.

Balance entre reducción de compuestos neoformados y mantenimiento de la calidad sensorial

Los procesos térmicos desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de las propiedades sensoriales de los alimentos. El calentamiento destruye enzimas, elimina microorganismos y disminuye la actividad de agua, lo que contribuye a la preservación de los alimentos (Capuano & Fogliano, 2011). Asimismo, durante estos procesos se generan compuestos con actividad antioxidante, antimicrobiana y antialérgica. Sin embargo, también se produce pérdida de compuestos termolábiles como vitaminas, aminoácidos esenciales como la lisina y el triptófano, además de la formación de contaminantes neoformados con potencial mutagénico, carcinogénico y citotóxico (Capuano & Fogliano, 2011). Algunos ejemplos de estos compuestos son aminas heterocíclicas, nitrosaminas, hidrocarburos policíclicos aromáticos como acrilamida y HMF (Capuano & Fogliano, 2011).

En 2002, la Swedish National Food Administration reportó la presencia de cantidades considerables de acrilamida en alimentos ricos en carbohidratos como papas fritas, café y pan. La formación de la acrilamida se da en la reacción de Maillard con asparagina libre como principal precursor. Los niños consumen más acrilamida que los adultos probablemente por su alto consumo calórico con relación al peso corporal al comer alimentos ricos en acrilamida como papas fritas y pan. En la población general, los principales alimentos que contribuyen a la ingesta de acrilamida son las papas fritas, el pan y el café (Capuano & Fogliano, 2011).

Con el fin de reducir la formación de acrilamida, se han propuesto modificaciones en las condiciones de procesamiento, incluyendo ajustes en el tiempo, temperatura de fritura, horneado, cambiando el tipo de horno, implementando fermentaciones prolongadas. Por ejemplo, en fermentaciones prolongadas con levaduras se reduce la concentración de acrilamida en pan, pero está asociada en el incremento de niveles de 3-monocloropropanodiol (3-MCPD) otro contaminante neoformado. Algunas estrategias de mitigación para reducir acrilamida en productos de panadería, pero no menguan el contenido de HMF. La adición de la enzima L-asparagina amidohidrolasa es una enzima capaz de catalizar la hidrólisis de la asparagina en ácido aspártico y amonio y de esta manera se disminuye el contenido del precursor asparagina. En el mercado está disponible Acrylaway®, que contiene asparaginasa de *Aspergillus niger* (Capuano & Fogliano, 2011).

Algunas estrategias de mitigación propuestas cambian las propiedades organolépticas de los alimentos por exceso de dorado como resultado de

la adición de glicina, la generación de sabores indeseables o el insuficiente dorado como resultado del perfil de tiempo-temperatura. Además, en cuanto a las preferencias el consumidor prefiere el producto convencional y no el que es tratado con la estrategia de mitigación (Capuano & Fogliano, 2011); sin embargo, si se hace una explicación de los motivos que llevan a implementar estas alternativas la aceptación o elección podría cambiar.

Muchos estudios indican que la acrilamida es neurotóxica en animales y humanos, además de ser tóxico para la reproducción, mutágeno en las células y carcinógeno en roedores. Después de la ingestión la acrilamida es absorbida y distribuida en animales y humanos a través de todo su cuerpo. Se ha encontrado presencia de este neocontaminante en el timo, el hígado, el corazón, el cerebro y los pulmones, en la leche materna, por lo que fácilmente se transfiere al feto y a los bebés lactantes. Se ha postulado que la neurotoxicidad de la acrilamida puede ser acumulativa y, por tanto, la exposición dietaria podría no ser despreciable (Capuano & Fogliano, 2011).

Cho (2014), trabajó con granos de café con tostación baja encontrando alta actividad antioxidante comparado con semillas no tostadas, sugiriendo que la reacción de Maillard genera productos y libera los polifenoles. El incremento del tiempo de tostación degrada los ácidos clorogénicos pero las tostaciones medias, altas y muy oscuras disminuyen las propiedades antioxidantes de los granos de café. Por tanto, la tostación ligera del café tiene mejores propiedades nutricionales.

Han *et al.* (2020) investigaron los efectos de las condiciones de extracción sobre el contenido de acrilamida/furano, la actividad antioxidante y las propiedades sensoriales del café de infusión en frío (cold brew), para muestras preparadas por remojo (steeping) y goteo (dripping) a varias temperaturas y tiempos. Las propiedades sensoriales se evaluaron usando una escala hedónica de nueve puntos y una prueba de clasificación de preferencia general. Las muestras preparadas por extracción de 3 horas mostraron los niveles más bajos de acrilamida, mientras que los contenidos menores de furano se observaron en muestras preparadas por remojo de 24 horas y goteo de 12 horas. Entre las muestras preparadas por remojo, la extraída durante 24 horas mostró el mayor contenido de fenoles totales, aunque hubo diferencias significativas para tiempos de extracción superiores a 12 horas, observándose una tendencia similar para la actividad de eliminación del radical aniónico ABTS. Por lo tanto, se encontró que el contenido de compuestos bioactivos y peligrosos, así como las propiedades

sensoriales, están influenciados por varias condiciones de extracción. El cold brew, preparado usando agua a baja temperatura para evitar la exposición prolongada al calor durante extracción, ha ganado popularidad entre los consumidores.

En la bebida de café, los contenidos de potentes carcinógenos como el furano y la acrilamida producidos por la reacción de Maillard durante el tostado de los granos de café son generalmente altos y dependen de las condiciones de preparación de la bebida (Han et al., 2020). La acrilamida, clasificada como probable carcinógeno para los humanos (grupo 2A) por la International Agency for Research on Cancer (IARC, 1994), es producida durante la tostación de café y cacao, posiblemente por la vía térmica inducida (Maillard) por la reacción de aminoácidos con compuestos carbonilo. Específicamente, los principales contribuyentes de la formación de acrilamida son la glucosa y la asparagina. La acrilamida se forma por la reacción de Maillard produciendo acroleína y amonio, es comúnmente observada durante el calentamiento de alimentos ricos en lípidos. La acrilamida presente en el café tostado se extrae hacia las bebidas y es solubilizada porque es altamente soluble en agua (Han et al., 2020).

El furano es hepatóxico y hepatocarcinogénico, y está clasificado como posible carcinógeno en humanos (Grupo 2B, IARC, 1995). Además, está presente en café como un compuesto aromático generado durante la tostación (Han et al., 2020). Este compuesto se forma por la degradación térmica de azúcares (solo o en presencia de aminoácidos) y la oxidación térmica del ácido ascórbico o de ácidos grasos poliinsaturados, la transferencia de furano del grano a la bebida depende del método de preparación empleado (Han et al., 2020).

Las características sensoriales de la bebida de café son afectadas por factores como la tostación del café, el origen y la variedad, el grado de tostación, la relación agua-café, la temperatura de la bebida y el tiempo de contacto. La SCAA sugiere como mejores prácticas para la preparación de la bebida en tiempos de contacto de 1 a 4 minutos para molienda fina, 4 a 6 minutos para café por método de goteo y de 6 a 8 minutos con molienda gruesa a 93 ± 3 °C (Han et al., 2020).

Ajustes en el proceso de fermentación - Caso de estudio

Modificación de las condiciones de fermentación para reducir precursores de compuestos neoformados

La investigación propuesta reviste gran importancia dado que la región de Huila, Colombia, tiene una alta producción de café y cacao. Además, es crucial debido a los riesgos asociados a la exposición a contaminantes neoformados (NFC) en

el café y cacao, como la acrilamida, el hidroximetilfurfural (HMF), el furano y el alcohol furfurílico (FFA), los cuales han sido vinculados a efectos nocivos para la salud, incluyendo mutagenicidad, carcinogenicidad y citotoxicidad. La falta de intervención en la mitigación de estos contaminantes podría resultar en una amenaza directa para la salud de los consumidores, especialmente considerando el alto nivel de consumo global de café y el gusto que tiene la población por el cacao y sus derivados.

La aplicación de levaduras en el proceso de fermentación del café y del cacao se presenta como una estrategia clave, ya que interviene en las rutas de formación de los NFC. La levadura, al metabolizar precursores como los azúcares, actúa como un agente mitigador, alterando las vías de reacción y reduciendo la formación de compuestos no deseados durante el proceso de tostado. La metodología propuesta se llevó a cabo mediante un diseño experimental que permitió evaluar de manera precisa los efectos de la aplicación de levaduras, utilizando un diseño completamente aleatorio.

Los resultados esperados plantean una reducción significativa de los niveles de acrilamida, HMF, furano y FFA en las muestras de café y cacao producidos en Huila, Colombia mediante la inoculación con *S. cerevisiae*. Esta mitigación no solo respaldaría la seguridad alimentaria y la salud pública, sino que también contribuiría al desarrollo de prácticas más saludables en la cadena de producción del café y el cacao, fortaleciendo la calidad del producto final y su aceptación sensorial. Esta información es clave para la industria de alimentos a gran, mediana y pequeña escala, sobre todo para los productores que tienen la iniciativa de escalar en el procesamiento tanto del café como del cacao.

Caso 1: Estudio en café del Huila- Colombia

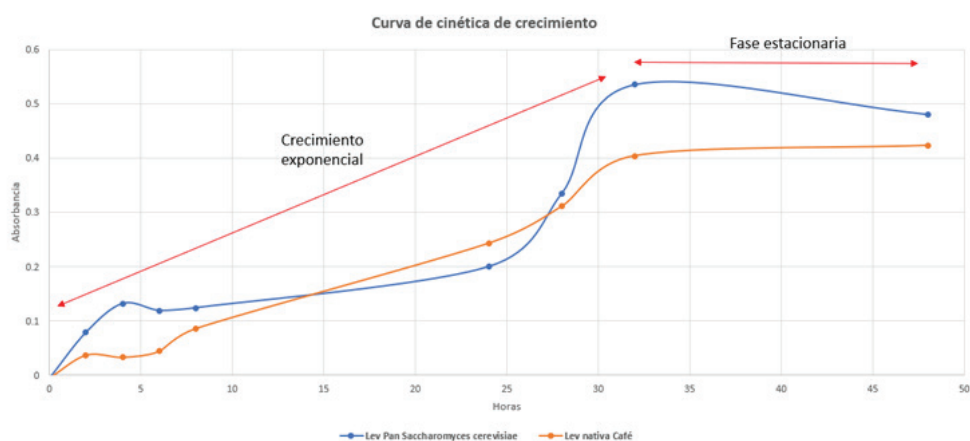
Se propuso tiempos de fermentación del café de 36 y 72 horas considerando tratamientos sin inóculo de levaduras y con inóculo de levaduras para ambos tiempos, el grano de café fue despulpado, dejando el mucílago ya que está compuesto de carbohidratos como la pectina, la glucosa y la fructosa, proteínas, minerales, polifenoles y cafeína como lo menciona el estudio realizado por Da Costa *et al.* (2023).

Cinética de crecimiento de levaduras

Se contaba con dos levaduras, *Candida krusei*, aislada de café producido en la región de Huila, Colombia, y la levadura comercial de pan identificada como *S. cerevisiae*, cada una fue inoculada en agua de peptona e incubada a 30

°C, se tomaron dos muestras en diferentes tiempos 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 24, 26, 30, 32 y 48 horas. Una muestra se utilizó para medir la densidad óptica en el espectrofotómetro a 600 nm (Pharmacia Biotech Ultrospec 2000 UV/VIS, Reino Unido), teniendo en cuenta el blanco, correspondiente al agua de peptona sin inóculo, el cual se ajustó a 0 de absorbancia. En cada medición se determinó el conteo de levaduras viables (UFC/mL) siguiendo lo indicado por Ordoñez-Lozano & Amoroch-Cruz (2024). De esta manera se encontraron los resultados presentados en la figura 1.

Figura 1. Cinética de crecimiento de *Candida krusei* y *S. cerevisiae*



La figura 1 muestra que la levadura *S. cerevisiae* (Levapan, Colombia) alcanza su punto máximo de la fase exponencial a las 32 h frente a *Candida Krusei* (levadura nativa de café), que está con menor absorbancia en el mismo tiempo, por esta razón se seleccionó *S. cerevisiae* para inocular en los procesos de fermentación de café y cacao propuestos en este estudio., además, tiene la ventaja de estar disponible y a un precio favorable para los caficultores y cacaoteros de Huila-Colombia.

Tratamientos

Se cosechó 100 kg de café del Huila-Colombia, variedad castillo de la zona de Cerro Neiva, en neveras de icopor con geles refrigerantes para ralentizar la fermentación. En la Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Surcolombiana se pesaron las cerezas, se clasificaron por densidad (flotación) tres veces, se desinfectaron con hipoclorito de sodio al 0,1%, seguido de enjuagues con agua potable en una tina de 1000 L.

Posteriormente, el café fue despulpado por medio de presión entre la camisa despulpadora, se distribuyó el café baba en cuatro microlotes de 10 kg. El sistema de fermentación fue cerrado para los cuatro tratamientos: T1: Levadura-36 h fermentación, T2: Levadura-72 h fermentación, T3: Sin adición de levaduras a 36 h de fermentación, T4: Sin adición de levaduras a 72 h de fermentación. Estos tratamientos se trabajaron por triplicado para un total de 12 corridas.

Se preparó medio líquido de caña de azúcar y el medio sólido se realizó con jugo de caña de azúcar y gelatina sin sabor esterilizados hasta ebullición, el medio sólido se vertió a las placas de Petri y se dejó solidificar. Se decidió emplear este medio de cultivo con el fin de no llevar a los tratamientos del café fermentado trazas indeseables de los medios de laboratorio comerciales, considerando que al final se iba a evaluar el efecto de la estrategia de mitigación en las características sensoriales del café y cacao.

Se tomaron muestras de 10 g de granos de café baba y dos muestras de 25 mL en mucílago en bolsas ziploc con ayuda de pipetas Pasteur durante el proceso de lavado para los recuentos de levaduras viables, la otra muestra de mucílago y granos fue empleada para determinar glucosa, fructosa, sacarosa, asparagina, ácidos clorogénicos y cafeína. Estos muestreos se hicieron al final de los tiempos de fermentación de 36 y 72 h; por tanto, se cuantificaron las levaduras viables al inicio y final de la fermentación de café para los tratamientos propuestos (Tabla 1). Se tomaron muestras de café en el tiempo cero de fermentación (M0), tiempo final de fermentación de café (M1), café después de secado trillado (M2), café tostado (M3).

Después de la fermentación, se realizó el secado solar en paseras de 1 m x 0,75 m, aproximadamente 8 h/día hasta un porcentaje de humedad de 10% en base húmeda. Durante el secado se realizaron volteos cada hora para garantizar la homogeneidad. Al finalizar, el café pergamino seco se almacenó en bolsas Grainpro durante la noche y posteriormente, dando una semana de estabilización del grano. Luego, el café fue trillado y se hizo el análisis físico. Para el tostado, se separaron 100 g de café verde en bolsas ziploc, almacenando en ultracongelador.

Se tostaron dos lotes de 200 g de café verde a 180°C durante 7 minutos. Un lote se destinó para el análisis sensorial y el otro para el fisicoquímico. Se determinaron los niveles de glucosa, fructosa, sacarosa, trigonelina, ácidos clorogénicos, cafeína, polifenoles totales, capacidad antioxidante por ABTS y DPPH, actividad de agua, humedad y pH en muestras de café verde y tostado. Además, en las muestras

de café tostado se evaluó la concentración de acrilamida, hidroximetilfurfural, alcohol furfurílico, ácido furúico en grano y se realizó análisis sensorial de la bebida.

El diseño experimental correspondió a un arreglo factorial completamente aleatorizado con dos factores principales: *i*) el tiempo de fermentación, evaluado en dos niveles (36 y 72 h), y *ii*) la inoculación de *Saccharomyces cerevisiae*, expresada en unidades formadoras de colonia por mililitro (UFC/mL). La combinación de estos factores dio lugar a cuatro tratamientos experimentales, cada uno con tres réplicas, para un total de 12 unidades experimentales. Este diseño permitió evaluar tanto los efectos individuales de cada factor como su posible interacción sobre las variables de respuesta analizadas (Salas, 2026).

Tabla 1. *Conteo de levaduras viables cultivables en tratamientos con café*

Tratamiento	Inicio fermentación (Log UFC/mL)	Final fermentación (Log UFC/mL)
T1	8,6 ± 0,9	9,5 ± 0,4
T2	8,6 ± 1,2	9,7 ± 1,7
T3	7,8 ± 0,1	9,0 ± 1,5
T4	8,2 ± 0,7	9,0 ± 2,7

La tabla 1 muestra que los cuatro tratamientos presentaron un conteo alto de levaduras viables cultivables al inicio de la fermentación, los mayores valores en T1 y T2 obedecen a la adición del cultivo iniciador de *S. cerevisiae*. Transcurrido el tiempo de fermentación de 36 y 72 horas la cantidad de levaduras se incrementó en un orden de magnitud para T1 y T2 mostrando adaptación de esta levadura a las condiciones proporcionadas. Ciertamente se evidencia un alto conteo de viables en T3 y T4 indicando la presencia de levaduras nativas en el café adquirido en el presente estudio. Sin embargo, el conteo de levaduras viables fue mayor en T1 y T2 donde se incorporó el cultivo iniciador. Se comprobó que el medio de cultivo con jugo de caña de azúcar fue apropiado para el crecimiento de las levaduras presentes en los tratamientos del presente estudio. Para verificar que el jugo de caña estuviera estéril, se tomó como control placas de jugo de caña de azúcar sin inóculo, incubando en las mismas condiciones y transcurrido el tiempo no se encontró crecimiento en estas placas control.

Del café antes de fermentar y después de fermentar se midieron parámetros como sólidos solubles (°Brix), color (CIELab), pH y actividad de agua (Aw).

En la determinación del color se siguió la metodología descrita por Zanin et al., (2016). El parámetro medido fue la luminosidad (L) en cada muestra por triplicado, empleando el colorímetro CR-20 (Konica Minolta Sensing Inc., Japón), utilizando el iluminante D65 y con un ángulo de observación de 10°. Previamente, el equipo se equilibró mediante una placa de cerámica blanca estándar. Las mediciones se realizaron en café almendra y tostado.

El pH se realizó mediante el potenciómetro OHAUS ST5000 (EE.UU) con 2.25 g de café, al cual se le adicionaron 50 ml de agua a una temperatura de 80 °C; luego, el extracto de café se llevó a temperatura ambiente y se realizó la medición. Esta determinación fue hecha a la almendra verde y grano tostado.

La determinación del contenido de humedad se hizo mediante el analizador termogravimétrico OHAUS MB45 (Parsippanv, EE. UU), empleando una temperatura de 105°C durante 5 minutos. Las mediciones se hicieron por triplicado según Zanin et al. (2016). Este análisis fue realizado a la almendra verde y al grano tostado. A continuación, los resultados de los análisis fisicoquímicos (Tabla 2).

Tabla 2. *Parámetros químicos de los tratamientos de café*

Tratamiento	Sólidos solubles (°Brix)		pH		Aw	L*	
	M0	M1	M0	M1	M3	M2	M3
T1	14,8±1,3	9±2,6	5,4±0,6	4,7±1,7	0.197±0.008	57.9±3.4	15±1.0
T2	13,7±2,3	7,2±0,8	7,1±0,6	5,2±2,0	0.192±0.011	60.4±2.8	15.4±1.0
T3	13±3,3	11±0,7	6,6±0,7	4,1±0,7	0.176±0.001	60.7±4.5	16.7±0.9
T4	13,4±2,1	8,5±1,9	6,1±0,6	3,6±0,2	0.174±0.017	56.7±2.0	16.4±1.3

El café antes de la fermentación presentó un contenido de sólidos solubles superior a 13°Brix y pH entre 5 y 6, al final de la fermentación de 36 y 72 h el pH pasó a valores entre 3,6 a 5,2 (Tabla 2), en el trabajo de Pajoy-Trujillo & Amorocho-Cruz (2024), propusieron tiempos de fermentación de 18 h obteniendo pH menores a 4,5, indicando que mayores tiempos de fermentación llevaron a un incremento en el pH.

En la tabla 3 se muestran los resultados de varianza de dos vías para las variables medidas (pH, Color (Coordenadas CIEL*a*b*) y contenido de humedad). Se aprecia que la inoculación de *S. cerevisiae* (A) ni el tiempo de fermentación (B), ni su interacción (AxB) presentaron diferencias estadísticamente significativas sobre las variables fisicoquímicas analizadas. Así, los resultados evidencian que las condiciones de fermentación no generan cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas del café en almendra verde.

Tabla 3. *Análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para las determinaciones fisicoquímicas*

Variable		A: Inoculación	B: Tiempo	AXB	Efecto significativo
pH		0,2731	0,1553	1,0000	-
	L*	0,8197	0,6682	0,1208	-
	a*	0,7432	0,4159	0,4159	-
	b*	0,5394	0,4522	0,2841	-
Contenido de humedad		0,1585	0,4886	0,0843	-

Nota: *diferencias significativas cuando el p-valor < 0,05.*

El hecho de no encontrar diferencias significativas indica que, aunque la fermentación involucre actividad microbiana, catalítica y productos como ácidos orgánicos y etanol, no llevó a modificar los parámetros fisicoquímicos de los tratamientos analizados. Normalmente, los cambios de pH se dan en el mucílago, y el grano presenta pocos cambios debido a la capacidad amortiguadora del sistema, así como a la gradual y limitada difusión de los metabolitos al interior de la masa de café. Además, tampoco se encontraron diferencias significativas en las coordenadas de color (L, a, b), lo que muestra que la fermentación no influye en cambios en los pigmentos del grano, las principales variaciones de color se dan en el tostado. El contenido de humedad presenta resultados similares entre tratamientos dado que el secado se desarrolló de manera similar para todos los tratamientos. De esta manera se aprecia que estrategias de mitigación como la inoculación de microorganismos como levaduras no afectan las características fisicoquímicas del café (Salas, 2026).

En relación con los compuestos bioactivos e índice de capacidad antioxidante, el análisis de varianza multifactorial mostró que la inoculación de *S. cerevisiae* presentó un efecto significativo sobre la capacidad antioxidante evaluada mediante ABTS ($p < 0.0001$) y sobre el contenido de polifenoles totales ($p = 0.0419$). Sin embargo, el tiempo de fermentación y la interacción entre factores no presentaron efectos significativos sobre estas variables. En cuando a la cafeína, ácidos clorogénicos y la capacidad antioxidante determinada mediante DPPH no mostraron diferencias estadísticas entre tratamientos. Estos resultados se muestran en la tabla 4.

La inoculación de levaduras como *S. cerevisiae* contribuye en la transformación del mucílago, facilitando la disponibilidad de los metabolitos antioxidantes,

Tabla 4. *Análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para los compuestos bioactivos e índices de capacidad antioxidante*

Variable	A: Inoculación	B: Tiempo	AXB	Efecto significativo
ACG	0,7398	0,4149	0,6522	-
CF	0,8141	0,5085	0,5159	-
DPPH	0,0908	0,7665	0,5615	-
ABTS	<0,0001	0,5133	0,8416	A
PT	0,0419	0,5279	0,6381	A

Nota: *diferencias significativas cuando el p-valor < 0,05.*

lo que se refleja en el aumento de los polifenoles y ABTS. La cafeína y los ácidos clorogénicos no presentaron diferencias significativas, debido a que las condiciones de fermentación no incidieron en estos compuestos. Así, se evidencia que la implementación de cultivos iniciadores en la fermentación no modifica compuestos bioactivos como los son los ácidos clorogénicos y la cafeína (Salas, 2026).

El análisis de varianza multifactorial en los datos de los precursores de los neocontaminantes como la sacarosa, la fructosa, la glucosa y la asparagina mostró que la inoculación con *S. cerevisiae* y el tiempo de fermentación tuvieron un efecto significativo sobre varios precursores. La sacarosa, glucosa y asparagina presentaron diferencias significativas en la interacción entre factores; sin embargo, la fructosa solo tuvo efecto significativo por la inoculación, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. *Análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para los precursores de contaminantes neoformados*

Variable	A: Inoculación	B: Tiempo	AXB	Efecto significativo
Sacarosa	0,0001	0,0125	0,0292	AXB
Fructosa	0,0025	0,5794	0,9316	A
Glucosa	<0,0001	0,0134	0,0006	AXB
Asparagina	0.6519	0.1241	0.0472	AXB

Nota: *diferencias significativas cuando el p-valor < 0,05.*

Los monosacáridos fructosa y glucosa disminuyeron debido a consumo de estos sustratos por parte de las levaduras inoculadas y las nativas. Estos resultados son importantes debido a que los azúcares como la glucosa y fructosa participan durante el tostado favoreciendo la formación de acrilamida, HMF y compuestos furánicos. La sacarosa y asparagina presentaron cambios por efecto de la inoculación y el tiempo de fermentación (Salas, 2026). La disminución de la sacarosa se puede relacionar con la hidrólisis de este disacárido en las diferentes etapas del procesamiento, generando glucosas y fructosas que seguramente fueron metabolizadas por las levaduras presentes en la masa de fermentación. Ciertamente, el proceso de café va a influir en la presencia o no de los precursores de los neocontaminantes como son los azúcares reductores y asparagina, dado que en el proceso húmedo se remueve el mucílago del grano el cual contiene azúcares reductores y asparagina (Tabla 3), mientras que en los procesos semiseco y natural el mucílago contribuye con aporte de estos precursores en el grano cosechado y fermentado. La disminución de la asparagina es clave para que no esté disponible durante la tosti3n para la formaci3n de NFC.

En los granos tostados la determinaci3n de los neocontaminantes, se encontr3 que la acrilamida present3 diferencias significativas por la inoculaci3n de *S. cerevisiae* y el tiempo de fermentaci3n, pero en el caso de HMF, alcohol furfurilico y furfural, no tuvieron diferencias estadísticas entre tratamientos. Los resultados se muestran en la tabla 6.

La disminuci3n de la acrilamida en los tratamientos con inoculaci3n de *S. cerevisiae* se puede relacionar con la menor disponibilidad de azúcares reductores y asparagina en el café verde, de esta manera se limitan las reacciones responsables de su formaci3n en el tostado (Salas, 2026). La EFSA y la FDA recomiendan un máximo de 0,40 mg/kg advirti3ndo que el consumo moderado de café no representa riesgos para la salud (Strocchi *et al.*, 2022). Por otro lado,

Tabla 6. Análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para los contaminantes neoformados en el café tostado

Variable	A: Inoculaci3n	B: Tiempo	AXB	Efecto significativo
Acrilamida (AA)	0,006	0,0410	0,1055	A, B
Hidroximetilfurfural (HMF)	0,4254	0,8824	0,4459	-
Alcohol furfurilico (FFA)	0,3335	0, 0943	0,4459	-
Furano (FA)	0,5968	0,9672	0,7129	-

Nota: diferencias significativas cuando el p-valor < 0,05.

Delgado-Andrade et al. (2024) encontraron en café instantáneo un contenido de 2890 mg/kg, en la presente investigación se determinaron 9,8 y 10,63 mg/kg para T1 y T2, respectivamente, indicando que la estrategia propuesta contribuye a la mitigación de acrilamida..

Análisis sensorial del café

• Consumidores

Se realizó el análisis sensorial con 62 consumidores, 36 mujeres y 26 hombres, de los cuales 7 eran estudiantes de pregrado, 11 bachilleres académicos, 12 técnicos, tecnólogos o especialistas, 24 profesionales, 5 personas con maestría y 3 con doctorado. De estos 9 estaban entre los 18 a 24 años, 21 entre 25 y 34 años, 11 entre los 35 y 44 años, 16 entre los 45 y 54 años y 5 eran mayores de 55 años. El 72,58% consumen café de especialidad y el 27,42% consume otro tipo de café. El 66,13% lo consume una o varias veces al día, 16,13% una o varias veces a la semana, 6,45% una o varias veces al mes, 4,84% los consumen esporádicamente, 6,45% casualmente. El consumo lo realizan en casa el 46,88%, en el trabajo el 39,06%, en cafeterías especializadas el 9,38%, en la Universidad el 1,56% y en cualquier lugar el 3,13%.

En cuanto a cómo acostumbran a consumir su café, el 70,97% lo hace filtrado o por inmersión (V60, Chemex, AeroPress, Prensa Francesa, Olleta, Otros) y el 29,03% en espresso. En cuanto a la preferencia por la presentación de café, el 74,19% opta por el molido y el 25,81% en grano.

Al detallar la percepción por atributo, en lo que respecta al olor en los cuatro tratamientos presentó aceptación por parte de los consumidores, dado que las categorías “Me agrada mucho” y “Me agrada” cuentan con una buena proporción de respuestas. Se destaca el tratamiento T1 con el mayor porcentaje. Igual sucedió con el tratamiento T2. Sin embargo, los tratamientos T3 y T4 mostraron porcentajes menores (Figura 2). Por tanto, se aprecia que la fermentación controlada favorece la percepción aromática del café, siendo aceptada por los consumidores y la propuesta de emplear cultivos iniciadores contribuye en los perfiles aromáticos dulces y le proporciona complejidad sensorial al café.

En cuanto al sabor se destacó el tratamiento T2 con la categoría “Me agrada mucho” con el 30,65%, seguido de T1 con 27,42%; estos datos muestran que menores tiempos de fermentación son mejor percibidos en el momento de probar el café (Figura 3). Aunque a algunos consumidores les agradaron los tratamientos T3 (27,12%) y T4 (26,67%) (Figura 3), lo que expresa la variabilidad en los gustos

Figura 2. Resultados de aceptación para el atributo “olor del café”

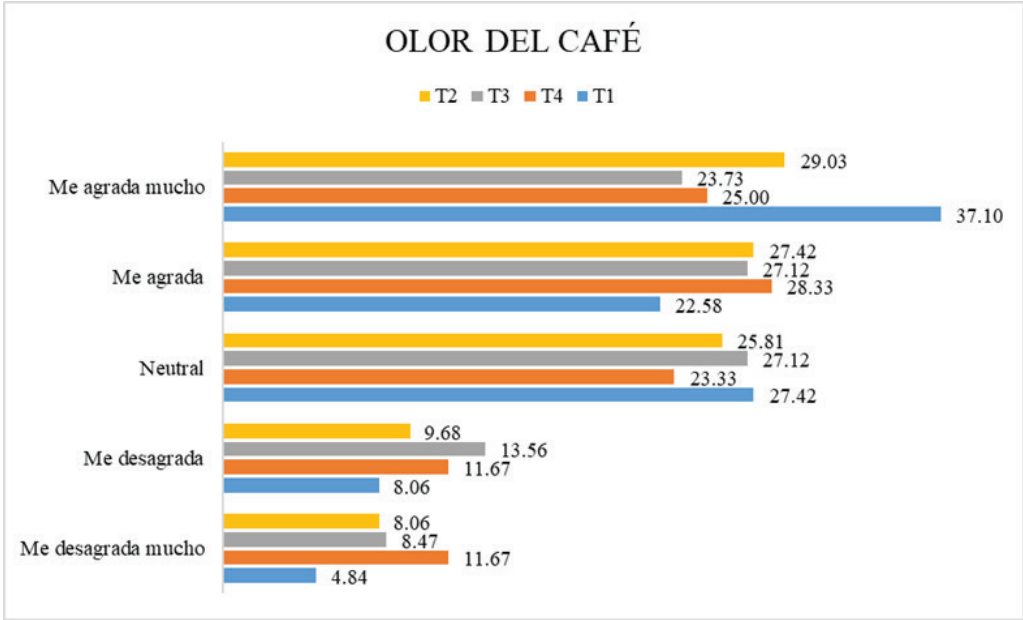
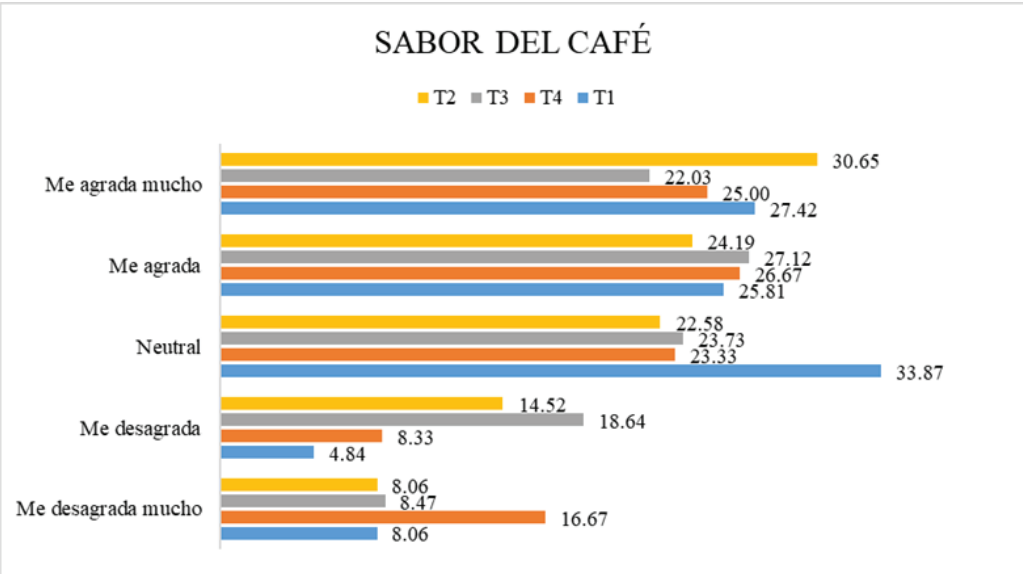


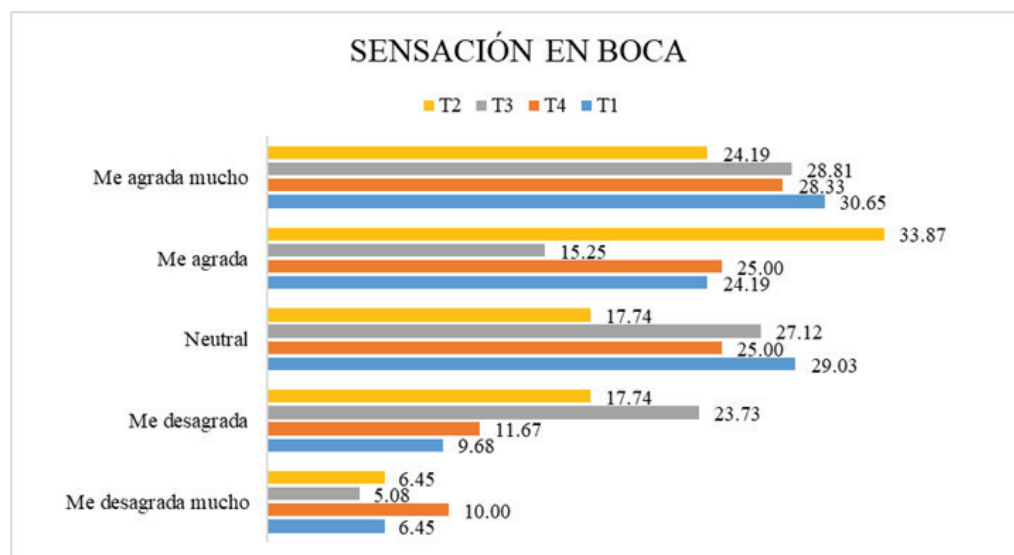
Figura 3. Resultados de aceptación para el atributo “sabor del café”



de los consumidores e indicando la importancia de las levaduras con la finalidad de reducir precursores y mitigar los NFC.

En el atributo “sensación en boca”, considerando las categorías “Me agrada mucho” y “Me agrada” se destacó el tratamiento T2 (58%), seguido de T1 (55%) (Figura 4); lo que confirma que incorporar el cultivo iniciador favorece esta apreciación sensorial relacionada con el cuerpo y balance.

Figura 4. Resultados de aceptación para el atributo “sensación en boca”



En cuanto a la acidez del café se resaltan los tratamientos T2 (53%) y T4 (53%) los cuales manejaron tiempos de fermentación de 72 horas, es de destacar que en T4, aunque no se inoculó *S. cerevisiae* el café cuenta con levaduras, bacterias ácido-lácticas, y acéticas nativas que en dicho tiempo de fermentación contribuyeron a la acidez percibida en el café degustado (Figura 5).

En cuanto a la calidad global del café, el tratamiento T2 presentó el mayor nivel de aceptación, con un 61,29 % de las respuestas concentradas en las categorías “Me agrada mucho” y “Me agrada”, seguido por el tratamiento T1 con un 59,6 %. Estos resultados sugieren que la inoculación de levaduras tuvo un efecto positivo sobre la percepción de la calidad global del café por parte de los consumidores. Aunque los tratamientos T3 y T4 registraron porcentajes de aceptación menores, correspondientes al 52 % y al 55 %, respectivamente, ambos fueron valorados favorablemente por más de la mitad de los participantes, lo que evidencia una aceptación general de las muestras evaluadas (Figura 6).

Figura 5. Resultados de aceptación para atributo “acidez del café”

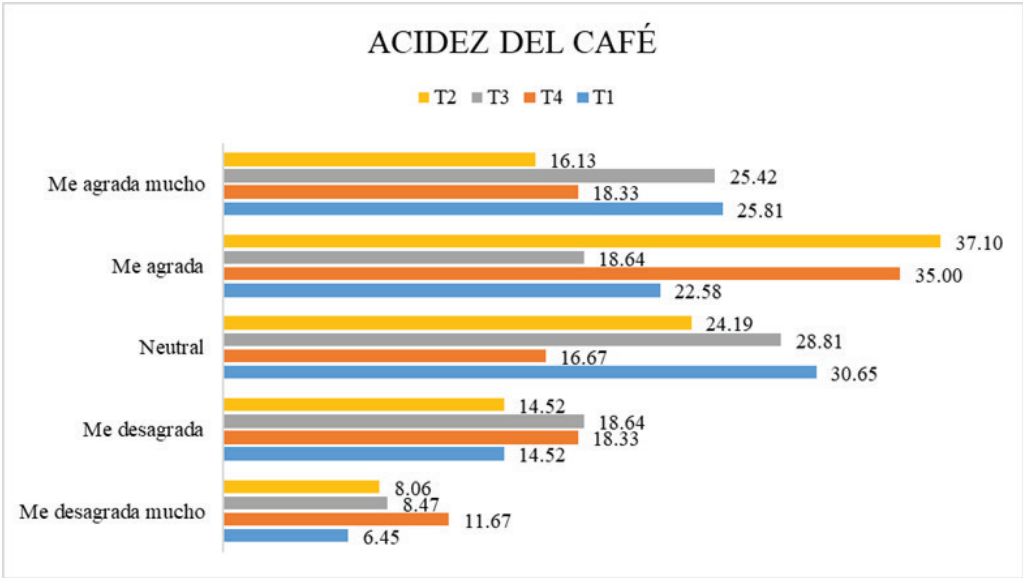
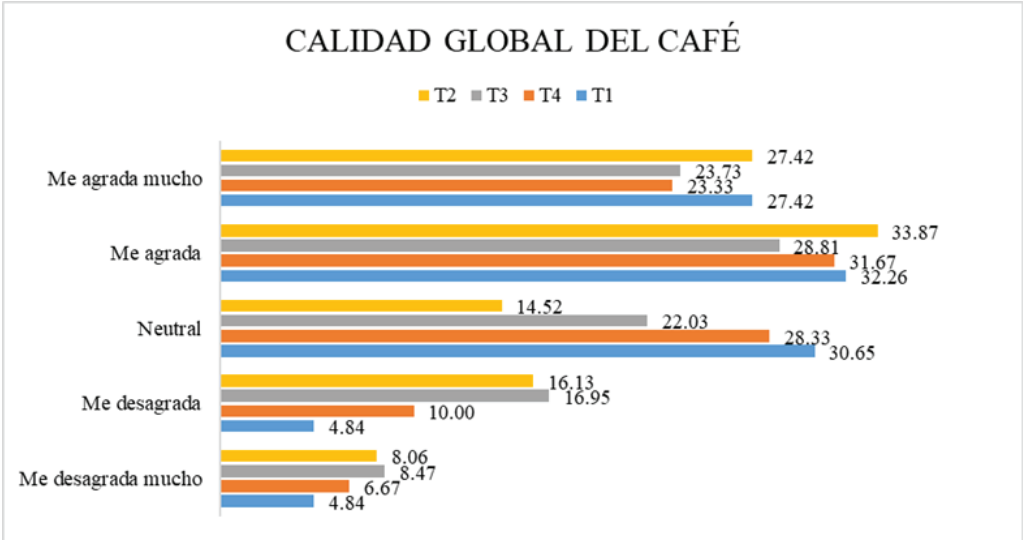


Figura 6. Resultados de aceptación para el atributo “calidad global del café”



Los tratamientos inoculados con *S. cerevisiae* obtuvieron las puntuaciones más altas en los atributos de aroma, sabor, sensación en boca y calidad global, lo que demuestra que la estrategia de mitigación propuesta es sensorialmente aceptada por los consumidores.

• **Jueces entrenados**

Los resultados del análisis sensorial se realizaron según el protocolo CVA. Se encontraron diferencias en el puntaje de taza entre los tratamientos propuestos. En cuanto a la calificación del olor, sensación en boca, acidez y calificación global del café, la mejor puntuación se presentó en el tratamiento T1, correspondiendo a un tratamiento con inoculación de levadura *S. cerevisiae*, estos resultados muestran que la estrategia de mitigación planteada contribuye a mejorar la apreciación sensorial por parte de los jueces entrenados.

Tabla 7. Calificación del puntaje de taza de los tratamientos evaluados mediante la metodología SCA-CVA

Tratamiento	Especificación del tratamiento		Puntaje de taza promedio (CVA)
	Fermentación	Inoculación	
T1	36 h	Sí	80
T2	72 h	Sí	83,25
T3	36 h	No	78,38
T4	72 h	No	79

La muestra T2 se destacó con un mayor puntaje de taza indicando que la incorporación del cultivo iniciador en la fermentación de café durante 72 horas permitió la transformación de los sólidos solubles del mucílago confiriendo al café atributos destacados como fruta madura, roja, madera clara, madera oscura, caramelo, panela, especias marrones, chocolate, ciruela, melaza, miel, chocolate con leche, ceniza, acidez seca, densidad seca. Lo cual coincide con los estudios que precisan que las fermentaciones controladas y prolongadas mejoran la complejidad aromática y el perfil en taza (Salas, 2026).

En cuanto a T1, la fermentación de 36 horas con *S. cerevisiae* obtuvo un puntaje de taza de 80 siendo considerado como café especial con notas de panela, chocolate amargo, fruta roja, caramelo, melaza, tabaco dulce, madera oscura, ceniza, ciruela, acidez seca, densidad seca. Los tratamientos T3 y T4 presentaron puntajes menores de 80 con atributos a melaza, caramelo, panela, nueces, ceniza, acidez seca, denso seco para T3 y T4 con notas a chocolate leche, chocolate amargo, caramelo, ceniza, panela, madera oscura, melaza, acidez seca, densidad seca, nibs de cacao, acidez seca, densidad seca; sin embargo, el tiempo de fermentación

propuesto y la actividad microbiana nativa no favoreció una calificación destacada. De esta manera, se muestra que la estrategia de mitigación propuesta no afecta en términos generales la puntuación de los tratamientos en los que se adicionó el cultivo iniciador de *S. cerevisiae*.

La evaluación sensorial se llevó a cabo mediante el protocolo CVA, que integra atributos asociados a la percepción afectiva y a la armonía global de la bebida. Los tratamientos con mayores puntuaciones correspondieron a aquellos que exhibieron una mejor limpieza, balance y complejidad sensorial. Sin embargo, todas las muestras recibieron cierta penalización en la valoración afectiva realizada por los jueces entrenados, lo que sugiere oportunidades de mejora en la optimización del perfil sensorial.

Caso 2. Estudio en cacao de Huila, Colombia

El cacao empleado fue cosechado en zona rural del municipio de Rivera, Huila. El cacao fue lavado, desinfectado, se cortó la mazorca para obtener los granos que se distribuyeron en dos tratamientos: T1: Sin levaduras y T2: Cultivo iniciador *S. cerevisiae*, considerando un diseño factorial con 12 días de fermentación. Cada tratamiento se realizó por triplicado.

Al inicio de la fermentación se evidenció un alto contenido de levaduras en T2 debido a que se incorporó el cultivo iniciador de *S. cerevisiae* (6,2 log ufc/mL), es de resaltar que el exocarpio del cacao protege los granos de cacao cubiertos de mucilago, es posible que en los procesos de corte, manipulación de los granos se incorporen microorganismos como levaduras, las cuales estuvieron del orden de 4,4 log ufc/mL. Transcurrido el tiempo de fermentación de 312 horas, equivalente a 13 días, la población de levaduras disminuyó a 2,6 log ufc/mL (Tabla 8) debido a que en cacao también participan las bacterias acéticas que predominan durante todo el tiempo de fermentación.

Los valores de pH durante la fermentación muestran un incremento a medida que avanza la fermentación (Tabla 9).

Tabla 8. *Conteo de levaduras viables cultivables en los tratamientos de cacao*

Tratamiento	Inicio fermentación (Log UFC/mL)	Final fermentación (Log UFC/mL)
T1-Cacao	4,4 ± 0,6	2,7 ± 1,3
T2-Cacao	6,2 ± 0,6	2,6 ± 1,9

Tabla 9. Valores de pH durante la fermentación de cacao

Tratamiento	pH						
	0 h	48 h	96 h	144 h	240 h	288 h	312 h
T1-Cacao	3,53±0,03	4,11±0,08	4,37±0,09	4,66±0,10	4,88±0,11	4,90±0,28	4,90±0,02
T2-Cacao	3,53±0,03	3,84±0,06	4,42±0,05	4,65±0,06	5,16±0,04	5,11±0,01	5,07±0,11

En cuanto a los sólidos solubles se evidencia en ambos tratamientos la disminución, en la fermentación de cacao los azúcares disacáridos son hidrolizados a azúcares reductores (Nongmaithem *et al.*, 2026), los cuales son empleados como sustratos por parte de los microorganismos presentes; es de destacar que el T2, en el cual se inoculó *S. cerevisiae* tuvo mayor consumo (Tabla 10), dado que tenía mayor cantidad de levaduras viables como se muestra en la Tabla 8. Es evidente que la inoculación de levaduras y el tiempo de fermentación generaron cambios significativos en el pH y los solidos solubles (Tabla 10).

Tabla 10. Análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para las determinaciones fisicoquímicas

Variable	A: Inoculación	B: Tiempo	AXB	Efecto significativo
pH	0,0469	0,0000	0,0013	A, B
Sólidos solubles	0,0000	0,0000	0,0003	A,B

Nota: diferencias significativas cuando el p-valor < 0,05.

El presente estudio confirmó que el mucílago y el grano de cacao cosechado en Rivera, Huila, contienen glucosa, fructosa, sacarosa y asparagina, compuestos que actúan como precursores importantes durante los procesos fermentativos y térmicos. Tras 13 días de fermentación, se observó una disminución en las concentraciones de estos compuestos, fenómeno asociado a la actividad metabólica de los microorganismos presentes durante la fermentación. Esta reducción fue más pronunciada en el tratamiento T2, correspondiente a la inoculación con *Saccharomyces cerevisiae*, lo que sugiere una mayor utilización de los sustratos por parte de la levadura.

No obstante, los resultados del análisis de varianza (ANOVA) indicaron que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos T1 y T2 para ninguna de las variables evaluadas ($p > 0,05$). Aunque se evidenciaron tendencias en los valores medios, particularmente en el contenido de azúcares reductores, estas diferencias no alcanzaron la significancia estadística (Tabla 11).

En conjunto, estos resultados sugieren que la composición inicial del grano (M0) no estuvo influenciada por el tratamiento aplicado. Por consiguiente, las diferencias observadas posteriormente en la formación de acrilamida no pueden atribuirse a variaciones iniciales en la concentración de los compuestos precursores, sino posiblemente a cambios ocurridos durante las etapas posteriores del proceso, especialmente durante la fermentación y el tostado.

Tabla 11. *Análisis de varianza (ANOVA) para los precursores de contaminantes neoformados*

Variable	Media T1	Media T2	p-valor	Significativo
Glucosa	0,85	1,16	0,490	No
Fructosa	1,07	1,57	0,416	No
Sacarosa	2,09	1,68	0,656	No
Asparagina	67,98	54,31	0,217	No

El análisis estadístico confirma que no existen diferencias significativas en la composición de azúcares y asparagina en grano verde entre los tratamientos evaluados. Por tanto, cualquier efecto en la mitigación de acrilamida debe atribuirse a cambios durante las etapas de procesamiento posteriores, particularmente durante el tostado.

En el cacao seco se identificó acrilamida, FFA y FA, en T2 donde se incorporó el inóculo, se presentó una menor cantidad de acrilamida y FA, lo cual se puede atribuir a la propuesta de mitigación mediante la inoculación de *S. cerevisiae*; esto no sucede de igual manera con FFA. Después del tostado, el contenido de acrilamida y FFA es menor en T2, en cuanto a HMF y FA registró una menor cantidad en T1.

Tabla 12. *Análisis de varianza (ANOVA) para los contaminantes neoformados en el café tostado*

Variable	T1 media	T2 media	p-valor	Significativo
Acrilamida	5,66	2,29	0,043	Sí
HMF	20,20	37,24	0,227	No
FFA	17,15	13,37	0,491	No
FA	11,97	14,13	0,696	No

Los resultados demuestran que la reducción de acrilamida no está asociada a cambios en los niveles de precursores, sino a modificaciones en la cinética de reacción durante el tostado. Aunque la asparagina muestra cierta influencia, el

papel del pH sugiere que el microambiente químico controla la formación de acrilamida. Este comportamiento indica que el tratamiento actúa sobre rutas intermedias de la reacción de Maillard más que sobre la disponibilidad inicial de sustratos.

Análisis sensorial de cacao

• Consumidores

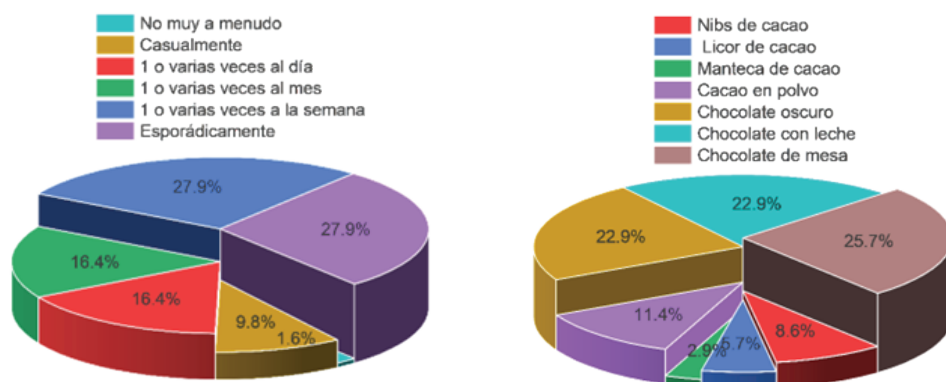
Cada tratamiento fue evaluado por triplicado, se relacionan las calificaciones por parte de los consumidores. En esta participaron 28 mujeres y 33 hombres; de los cuales 10 eran estudiantes de pregrado o posgrado; 7, bachiller académico; 6, técnicos, tecnólogo o especialista; 23, profesionales; 11, con título de máster; y 4, con doctorado.

En cuanto a la distribución por edades, de 18-24 años, 11 participantes, 31 consumidores entre 24 a 34 años, 10 entre 34 a 44 años, 7 entre 45-54 años y 2 mayores de 55 años. De los participantes, 30 consumen licor de cacao y 31 no lo hacían.

En cuanto a la frecuencia de consumo, 10 lo hacían una o varias veces al día, 17 una o varias veces a la semana, 10 una o varias veces al mes, 17 esporádicamente, 6 casualmente y 1 no muy a menudo (Figura 7 A y B).

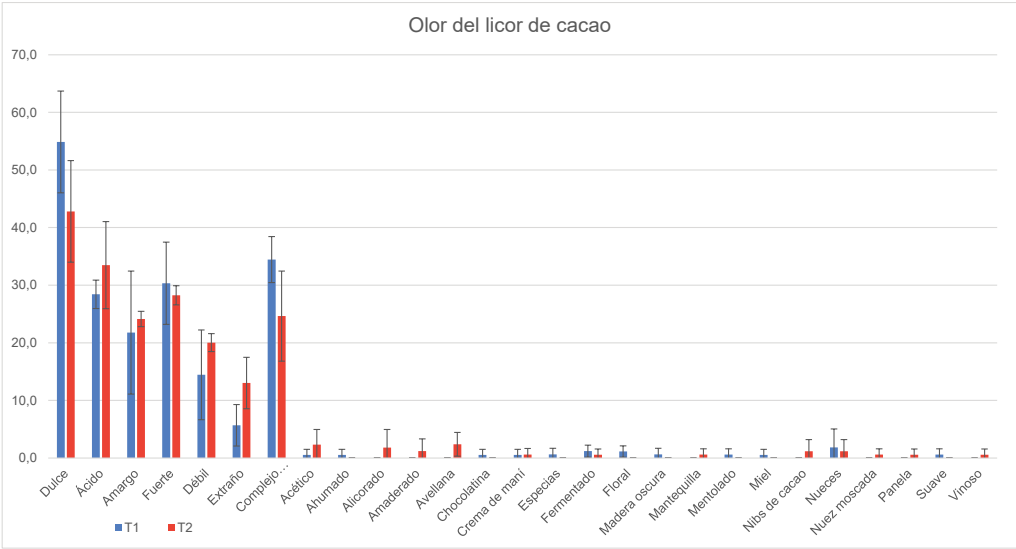
La figura 8, muestra los atributos de olor percibidos por los consumidores con su respectivo puntaje por tratamiento y replica, donde se destaca T1. Así, la

Figura 7. A. Frecuencia de consumo de productos derivados de cacao. **B.** Tipos de productos de cacao consumidos



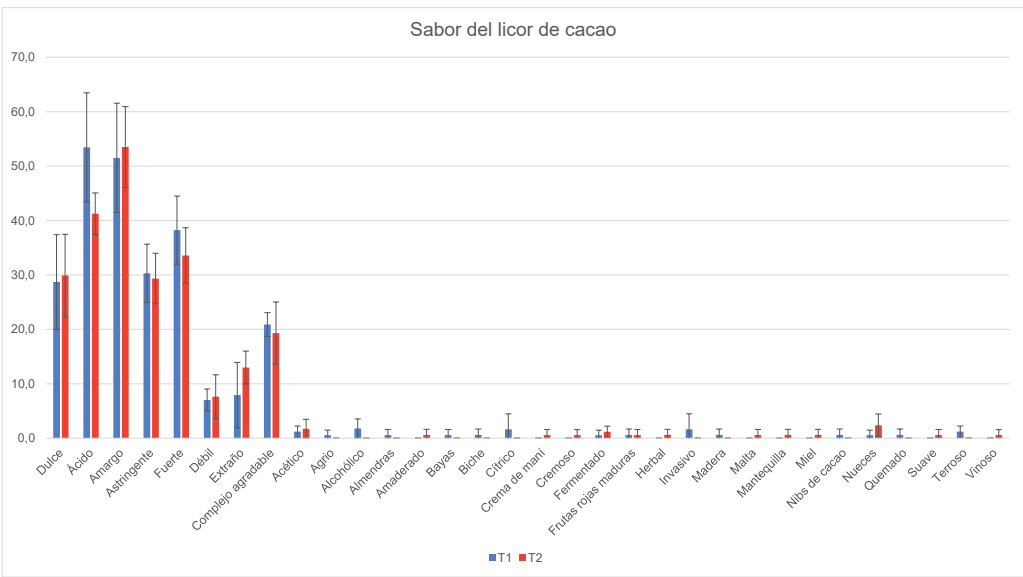
propuesta de mitigación disminuye el puntaje en cuanto a las características del olor.

Figura 8. Olor del licor de cacao



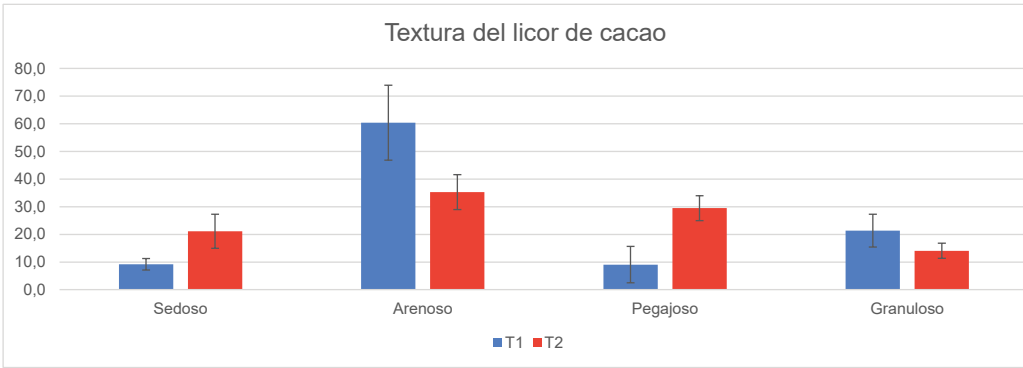
En la figura 9 se presentan los atributos relacionados con el sabor de cacao por tratamiento con sus respectivas replicas; los mayores puntajes se aprecian para T1, siendo cercanos los de T2.

Figura 9. Sabor del licor de cacao



La textura del tratamiento T2 al que se le adicionó el cultivo iniciador se destaca por ser sedoso y pegajoso (Figura 10).

Figura 10. *Textura del licor de cacao*



El olor, sabor residual, sensación en boca, textura, acidez y calificación global del licor de cacao en ambos tratamientos obtuvieron buena calificación, predominando la valoración de 4/5 (Figura 11, 12, 13, 14, 15). Los resultados de acidez evidencian una buena fermentación donde los ácidos acético y láctico producidos en la pulpa son difundidos al cotiledón, incrementando la acidez de la fracción interna de la almendra (Frank et al., 2023).

Figura 11. *Calificación del olor del licor de cacao*

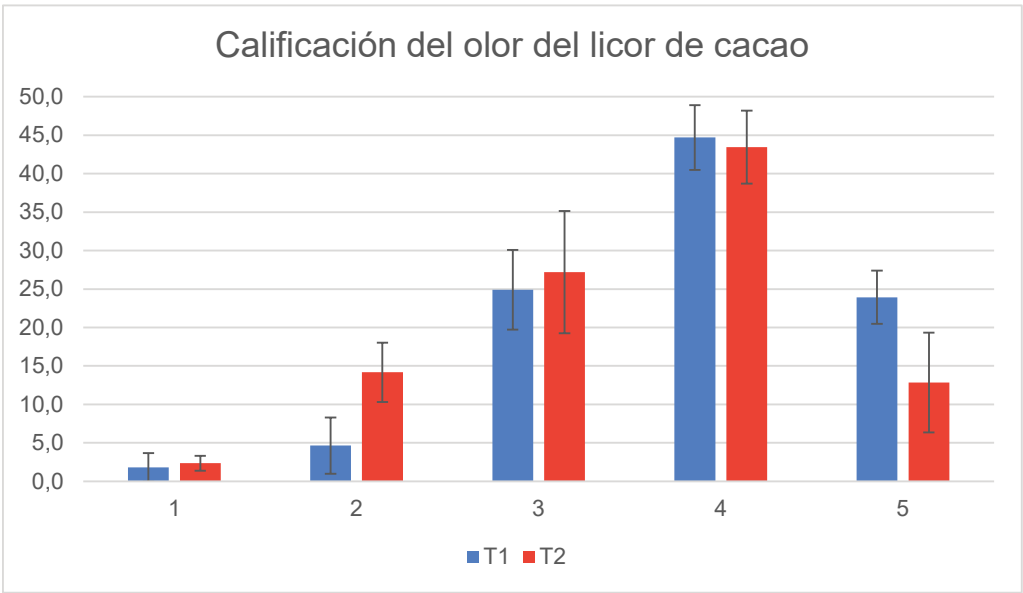


Figura 12. Calificación sabor residual del licor de cacao

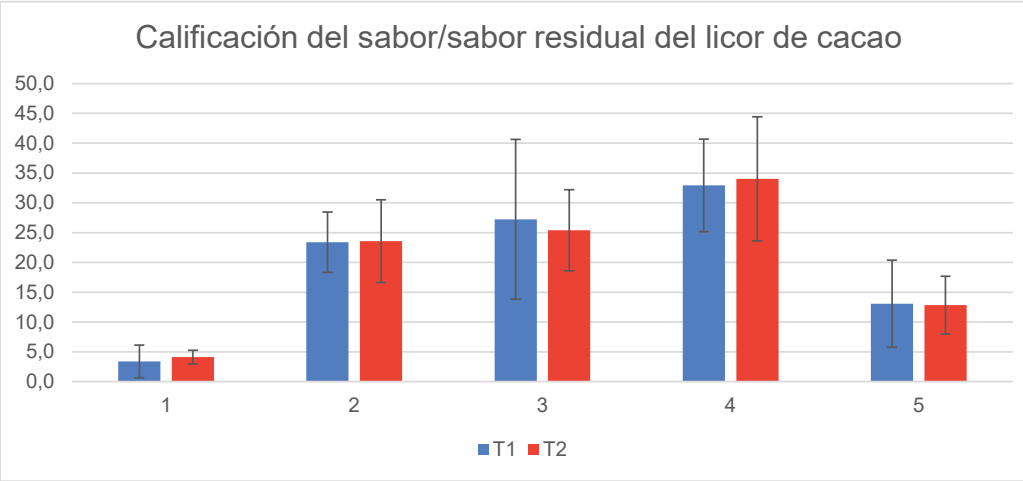


Figura 13. Calificación de la sensación en boca y textura del licor de cacao

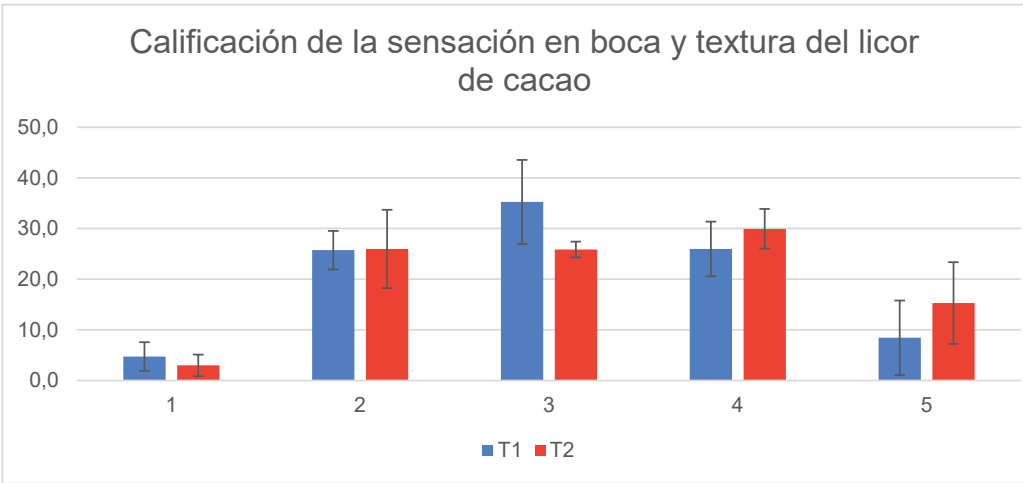


Figura 14. Calificación de la acidez del licor del cacao

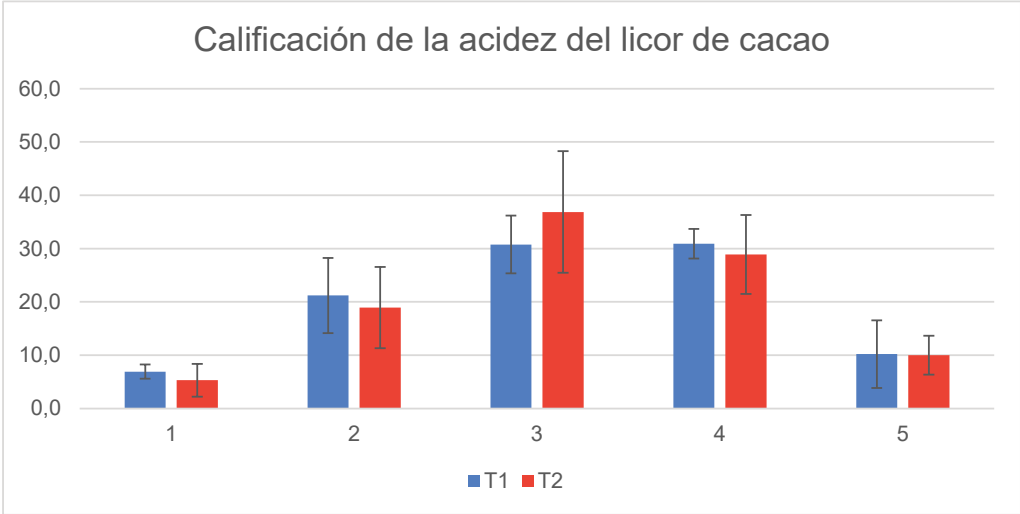
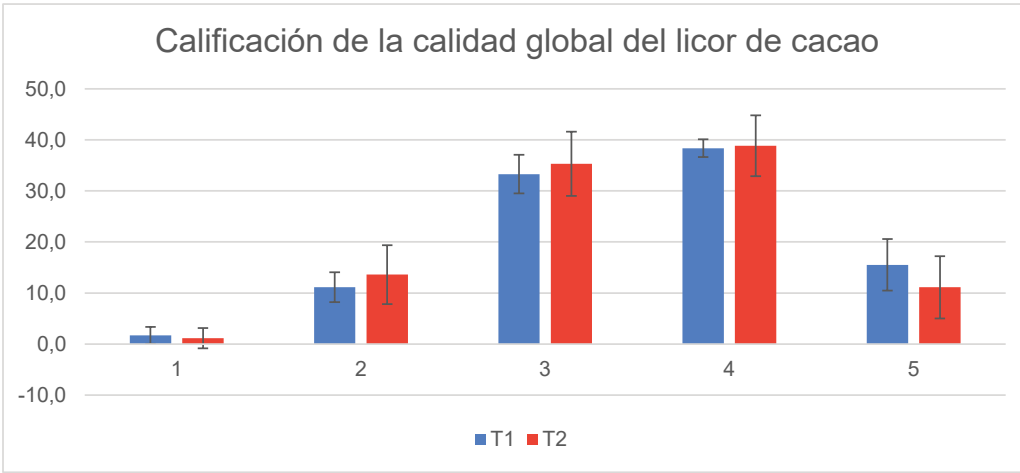


Figura 15. Calificación de la calidad global del licor de cacao



• Catadores

La calificación por parte de los catadores de ambos tratamientos es próxima, lo que indica que la propuesta de mitigación no afecta las características sensoriales del cacao producido en Rivera-Huila en Colombia (Tabla 11).

Tabla 13. Calificación por parte de catadores

Descriptor	T1-Cacao	T2-Cacao	Descriptor	T1-Cacao	T2-Cacao
Cacao	5,0 ± 0,7	5,0 ± 0,7	Clara	0,5 ± 0,7	1,1 ± 1,2
Acidez (Total)	4,1 ± 1,6	3,7 ± 1,1	Oscura	0,6 ± 1,0	0,5 ± 0,7
Frutal	1,4 ± 1,3	1,8 ± 0,9	Resina	0,5 ± 0,8	0,2 ± 0,6
Acética	2,3 ± 1,4	1,8 ± 0,9	Especia (Total)	1,0 ± 1,2	1,7 ± 1,2
Láctica	0,3 ± 0,5	0,1 ± 0,3	Espicias	0,7 ± 0,9	1,1 ± 1,0
Mineral-Butírica	0,1 ± 0,3	0,1 ± 0,3	Tabaco	0,3 ± 0,5	0,6 ± 0,7
Amargor	2,3 ± 0,8	2,3 ± 0,7	Sazonado/Umami	0,1 ± 0,3	0,0 ± 0,0
Astringencia	2,9 ± 1,1	2,5 ± 1,0	Nuez (total)	1,8 ± 1,5	2,2 ± 1,2
Fruta fresca (total)	3,7 ± 2,9	3,7 ± 2,3	Piel de la nuez	0,7 ± 1,0	1,2 ± 0,8
Bayas	0,8 ± 1,0	0,7 ± 1,1	Caramelo / Panela	0,2 ± 0,4	0,8 ± 0,8
Cítricos	1,3 ± 1,1	1,6 ± 0,8	Grado de tostado	5,8 ± 1,1	5,4 ± 1,2
Oscura	0,3 ± 0,5	0,5 ± 0,5	Sabores Atípicos (defectos total)	1,0 ± 0,9	0,3 ± 0,5
Pulpa amarilla – Anaranjada – Blanca	0,8 ± 1,2	0,5 ± 0,9	Sucio / Empolvado	0,1 ± 0,3	0,2 ± 0,4
Tropical	0,5 ± 0,8	0,3 ± 0,7	Humedad	0,4 ± 0,5	0,0 ± 0,0
Fruta marrón (Total)	1,3 ± 1,4	1,1 ± 0,8	Mohoso	0,0 ± 0,0	0,1 ± 0,3
Seca	0,4 ± 0,7	0,7 ± 0,8	Sobre fermentado /Fruta podrida	0,4 ± 0,7	0,0 ± 0,0
Marrón	0,3 ± 0,5	0,3 ± 0,5			
Sobre madura	0,5 ± 1,0	0,2 ± 0,4			
Vegetal (Total)	1,3 ± 0,8	1,8 ± 1,2			
Pasto/Vegetal verde/Hierba	1,3 ± 0,8	1,8 ± 1,1			
Terroso/Hongo/Musgo/Verde	0,1 ± 0,3	0,1 ± 0,3			
Madera (Total)	1,6 ± 1,4	1,8 ± 1,5			
			Calidad Global	5,5 ± 0,8	6,1 ± 0,4

Consideraciones finales

La selección de frutos maduros, el empleo de cultivos iniciadores de levaduras y bacterias ácido-lácticas así como el control del perfil de temperaturas y de los tiempos de tostación del café y el cacao, constituyen estrategias efectivas para la mitigación de compuestos neoformados.

Recomendaciones para la industria alimentaria sobre la implementación de estrategias de mitigación

La industria alimentaria, tanto a nivel grande, mediana y pequeña escala, tiene al alcance la implementación de las estrategias de mitigación mediante el trabajo en conjunto con expertos en el tema de mitigación de compuestos neoformados (NFC). Para ello, es clave invertir en conocimiento alrededor de la composición del café y del cacao según la variedad y el origen; implementar el estudio con diferentes cultivos iniciadores, explorando nuevas cepas que puedan incorporarse en la fermentación; aplicar tratamientos enzimáticos tanto a pequeña como a gran

escala; explorar nuevos diseños de fermentadores para controlar el seguimiento de variables como el pH, la temperatura, la disponibilidad de oxígeno; profundizar en el conocimiento de las condiciones favorables de secado; e invertir en la mejora de los equipos destinados a la tostación de los granos de café y cacao, donde pueda controlarse el tiempo, la temperatura, la presión, el vacío y el uso de fluidos supercríticos. Estas acciones contribuirán a ofrecer a los consumidores un alimento seguro, que nutra, favorezca su estado de salud y, evidentemente, que disfrute con todos sus sentidos.

Propuestas para futuras investigaciones en la mitigación de compuestos neoformados en cacao y café

Es clave conformar un banco de cepas de levaduras y de bacterias ácido-lácticas, aislándolas del cacao y café de cada región donde se produce; además, se recomienda explorar cepas microbianas comerciales para incorporarlas en los procesos de fermentación. Asimismo, se propone implementar en la región la producción de la enzima asparaginasa por parte de microorganismos como *E. coli* y *Aspergillus*, para aplicarlos a los procesos de fermentación del café y el cacao y posteriormente escalar esta estrategia a nivel industrial en la región. Adicionalmente, se recomienda innovar en el diseño de tostadoras de café y cacao que optimicen el proceso, favoreciendo tanto el desarrollo de los atributos sensoriales deseables en estos productos como la mitigación de los neoformados (NFC).

Referencias

- Akilloğlu, H., & Gökmen, V. (2014). Mitigation of acrylamide and hydroxymethylfurfural in instant coffee by yeast fermentation. *Food Research International*, 61, 252-256. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.07.057>
- Albouchi, A., & Murkovic, M. (2020). Investigation on the mitigation effects of furfuryl alcohol and 5-hydroxymethylfurfural and their carboxylic acid derivatives in coffee and coffee-related model systems. *Food Research International*, 137, 109444. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109444>
- Alves, R. C., Rodrigues, F., Antónia-Nunes, M., Vinha, A. F., & Oliveira, M. B. P. P. (2017). State of the art in coffee processing by-products. In C. M. Galanakis (Ed.). *Handbook of coffee processing by-products: Sustainable applications* (pp. 1-26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811290-8.00001-3>
- Alves, R. C., Soares, C., Casal, S., Fernandes, J. O., & Oliveira, M. B. P. P. (2010). Acrylamide in espresso coffee: Influence of species, roast degree and brew length. *Food Chemistry*, 119(3), 929-934. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.07.051>
- Amrein, T. M., Bachmann, A. N., Noti, A., Biedermann, M., Ferrez-Barbosa, M., Biedermann-Brem, S., Grob, K., Keiser, A., Realini, P., Escher, F., & Amado, R. (2003). Potential of acrylamide formation, sugars, and free asparagine in potatoes: A comparison of cultivars and farming systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(18), 5556-5560. <https://doi.org/10.1021/jf034344v>
- Andrzejewski, D., Roach, J. A. G., Gay, M. L., & Musser, S. M. (2004). Analysis of coffee for the presence of acrylamide by LC-MS/MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(7), 1996-2002. <https://doi.org/10.1021/jf0349634>
- Anese, M., Nicoli, M. C., Verardo, G., Munari, M., Mirolo, G., & Bortolomeazzi, R. (2014). Effect of vacuum roasting on acrylamide formation and reduction in coffee beans. *Food Chemistry*, 145, 168-172. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.08.047>
- Bagdonaite, K., Derler, K., & Murkovic, M. (2008). Determination of acrylamide during roasting of coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15), 6081-6086. <https://doi.org/10.1021/jf073051p>
- Baggenstoss, J., Poisson, L., Kaegi, R., Perren, R., & Escher, F. (2008). Roasting and aroma formation: Effect of initial moisture content and steam treatment. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(14), 5847-5851. <https://doi.org/10.1021/jf8003288>
- Banchero, M., Pellegrino, G., & Manna, L. (2013). Supercritical fluid extraction as a potential mitigation strategy for the reduction of acrylamide level in coffee. *Journal of Food Engineering*, 115(3), 292-297. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.10.045>

- Barrios-Rodríguez, Y. F., Gutiérrez-Guzmán, N., Pedreschi, F., & Mariotti-Celis, M. S. (2022). Rational design of technologies for the mitigation of neo-formed contaminants in roasted coffee. *Trends in Food Science & Technology*, 120, 223-235. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.12.034>
- Budryn, G., Nebesny, E., & Oracz, J. (2015). Correlation between the stability of chlorogenic acids, antioxidant activity and acrylamide content in coffee beans roasted in different conditions. *International Journal of Food Properties*, 18(2), 290-302. <https://doi.org/10.1080/10942912.2013.805769>
- Calderon, N., Jiang, G. Z., Gibney, P. A., & Dando, R. (2023). A consumer assessment of fermented green coffee beans with common beer/wine yeast strains for novel flavor properties. *Fermentation*, 9(10), 865. <https://doi.org/10.3390/fermentation9100865>
- Campos, S. M., Martínez-Burgos, W. J., dos Reis, G. A., Ocán-Torres, D. Y., dos Santos Costa, G., Rosas-Vega, F., Álvarez-Badel, B., Sotelo-Coronado, L., Lima-Serra, J., & Soccol, C. R. (2025). The role of microbial dynamics, sensorial compounds, and producing regions in cocoa fermentation. *Microbiology Research*, 16(4), 75. <https://doi.org/10.3390/microbiolres16040075>
- Cao, X., Wu, H., Viejo, C. G., Dunshea, F. R., & Suleria, H. (2023). Effects of postharvest processing on aroma formation in roasted coffee: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 58(3), 1007-1027. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16261>
- Capuano, E., & Fogliano, V. (2011). Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural (HMF): A review on metabolism, toxicity, occurrence in food and mitigation strategies. *LWT - Food Science and Technology*, 44(4), 793-810. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.11.002>
- Cho, A. R., Park, K. W., Kim, K. M., Kim, S. Y., & Han, J. (2014). Influence of roasting conditions on the antioxidant characteristics of Colombian coffee (*Coffea arabica* L.) beans. *Journal of Food Biochemistry*, 38(3), 271-280. <https://doi.org/10.1111/jfbc.12045>
- de Brito, E. S., Pezoa-García, N. H., Gallao, M. I., Cortelazzo, A. L., Fevereiro, P. S., & Braga, M. R. (2000). Structural and chemical changes in cocoa (*Theobroma cacao* L.) during fermentation, drying and roasting. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81(2), 281-288. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(20010115\)81:2%3C281::AID-JSFA808%3E3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1097-0010(20010115)81:2%3C281::AID-JSFA808%3E3.0.CO;2-B)
- Delatour, T., Perisset, A., Goldmann, T., Riediker, S., & Stadler, R.H. (2004). Improved sample preparation to determine acrylamide in difficult matrices such as chocolate powder, cocoa, and coffee by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(15), 4625-4631. <https://doi.org/10.1021/jf0498362>

- Delgado-Andrade, C., Morales, F. J., & Mesías, M. (2024). Acrylamide and HMF occurrence and bioaccessibility in instant coffee and coffee substitutes. A study on isolated and milk-combined beverages. *Food Research International*, 194, 114886. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114886>
- Doblado-Mendoza, A.L. (2022). *Estudio del efecto de la variación de parámetros térmicos (temperatura y grado de tostado) y la aplicación de microorganismos (Candida krusei) sobre el contenido de furano y 5-hidroximetilfurfural, compuestos bioactivos y perfil sensorial del café tostado (variedad Coffea arabica)*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188889>
- Farah, D. M. H., Zaibunnisa, A. H., Misnawi, J., & Zainal, S. (2012). Effect of roasting process on the concentration of acrylamide and pyrazines in roasted cocoa beans from different origins. *APCBEE Procedia*, 4, 204-208. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.11.034>
- Frank, F., Chávez-García, G., Vásquez-Cortez, L., Alvarado-Vásquez, K., Revilla-Escobar, K., Vera-Chang, J., Radice, M., & Maddela-Naga, R. (2023). Evaluación del contenido de cadmio y caracterización fisicoquímica de almendras y pasta de cacao (*Theobroma cacao*). *Innovaciencia*, 11(1), 1-11. <http://doi.org/10.15649/2346075X.3411>
- Gil, M., Gallego, V., Jaramillo, Y., Gil, M., & Uribe, D. (2022). Advances on acrylamide in cocoa and its derivatives: A challenge to control from postharvest to industrial processing. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100903. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100903>
- Göncüoğlu, N., Kocadağlı, T., & Gökmen, V. (2002). Safety concerns of processed foods in terms of neo-formed contaminants and NOVA classification. *Current Opinion in Food Science*, 47, 100876. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2022.100876>
- Granvogl, M., Jezussek, M., Koehler, P., & Schieberle, P. (2004). Quantitation of 3-aminopropionamide in potatoes: A minor but potent precursor in acrylamide formation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(15), 4751-4757. <https://doi.org/10.1021/jf049581s>
- Han, J.W., Boo, H., & Chung, M.S. (2020). Effect of extraction conditions on acrylamide/furan content, antioxidant activity, and sensory properties of cold brew coffee. *Food Science and Biotechnology*, 29(8), 1071-1080. <https://doi.org/10.1007/s10068-020-00747-1>
- Hernández, M.S. (2025). *Desarrollo de un inóculo microbiano optimizado a partir de cepas nativas de levaduras para la fermentación del cacao Theobroma cacao L.*
- IARC. (1994). *Acrylamide. IARC monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Some Industrial Chemicals*, 60, 389-434.

- IARC. (1995). Furan. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Some Industrial Chemicals*, 63, 393-407.
- ICO. (2022). *Beyond coffee, Towards a circular coffee economy*. <https://www.icocoffee.org/documents/cy2024-25/coffee-development-report-2022-23.pdf>
- Krysiak, W. (2011). Effects of convective and microwave roasting on the physicochemical properties of cocoa beans and cocoa butter extracted from this material. *Grasas y Aceites*, 62(4), 467-478. <https://doi.org/10.3989/gya.114910>
- Kumari, A., Mishra, S., Mithul-Aravind, S., Kruthi, M. K., & Chakkaravarthi, S. (2025). The microbial approach for mitigation of acrylamide in processed foods: A critical review. *Food Chemistry*, 494, 146194. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2025.146194>
- Locas, C.P., & Yaylayan, V. A. (2008). Isotope labeling studies on the formation of 5-(hydroxymethyl)-2-furaldehyde (HMF) from sucrose by pyrolysis-GC/MS. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15), 6717-6723. <https://doi.org/10.1021/jf8010245>
- Markakis, P., Livingston, G. E., & Fellers, R. C. (1957). Quantitative aspects of strawberry pigment degradation. *Food Research*, 22(2), 117-130. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1957.tb16991.x>
- McClure, A. P., Hopfer, H., & Grün, I. U. (2022). Optimizing consumer acceptability of 100% chocolate through roasting treatments and effects on bitterness and other important sensory characteristics. *Current Research in Food Science*, 5, 167-174, <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.01.005>
- Medina-Orjuela, M. E., Barrios-Rodríguez, Y. F., Carranza, C., Amorocho-Cruz, C., Gentile, P., & Girón-Hernández, J. (2024). Enhancing analysis of neo-formed contaminants in two relevant food global commodities: Coffee and cocoa. *Heliyon*, 10(10), e31506. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31506>
- Misnawi, S., Jinap, S., Jamilah, B., & Nazamid, S. (2004). Effect of polyphenol concentration on pyrazine formation during cocoa liquor roasting. *Food Chemistry*, 85(1), 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.06.005>
- Moon, J. K., & Shibamoto, T. (2010). Formation of volatile chemicals from thermal degradation of less volatile coffee components: quinic acid, caffeic acid, and chlorogenic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(9), 5465-5470. <https://doi.org/10.1021/jf1005148>
- Navarini, L., Del Terra, L., Colomban, S., Lonzarich, V., & Suggi-Liverani, F. (2012). *Method for reducing the content of acrylamide in a roasted coffee*. (U.S. Patent No. 20140193541A1). Illycaffè S.p.A. <https://patents.google.com/patent/US20140193541A1/en>

- Niemenak, N., Rohsius, C., Elwers, S., Ndoumou, D. O., & Lieberei, R. (2006). Comparative study of different cocoa (*Theobroma cacao* L.) clones in terms of their phenolics and anthocyanins contents. *Journal of Food Composition and Analysis*, 19(6-7), 612-619. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2005.02.006>
- Nongmaithem, S. C., Singh, C. N., Gupta, K. K., K, K., Singamayum, F. N., C, S., ... Dwivedi, M. (2026). Cocoa neo-formed contaminants: forming mechanism, processing effects on nutritional and impacts on human neurological system. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 66(15), 2791-2807. <https://doi.org/10.1080/10408398.2025.2587678>
- Ordoñez-Lozano, S., & Amorocho-Cruz, C. M. (2024). Lactic acid bacteria as inhibitory agents of *Escherichia coli* ATCC 25922. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 26(2), 45-54. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v26n2.112781>
- Pajoy-Trujillo, M. A., & Amorocho-Cruz, C. M. (2024). Evaluación de nueva cepa de levadura para el uso en la fermentación húmeda del café arábica variedad Castillo. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 26(1), 20-31. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v26n1.113115>
- Pavesi-Arisseto, A., Vicente, E., Ueno, M. S., Tfouni, S.A.V., & de Figueiredo, M. C. (2011). Furan levels in coffee as influenced by species, roast degree, and brewing procedures. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(7), 3118-3124. <https://doi.org/10.1021/jf104868g>
- Peña-Correa, R. F., Ataç-Mogol, B., & Fogliano, V. (2024). The impact of roasting on cocoa quality parameters. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 64(13), 4348-4361. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2141191>
- Petisca, C., Pérez-Palacios, T., Farah, A., Pinho, O., & Ferreira, I. M. P. L. V. O. (2013). Furans and other volatile compounds in ground roasted and espresso coffee using headspace solid-phase microextraction: Effect of roasting speed. *Food and Bioproducts Processing*, 91(3), 233-241. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2012.10.003>
- Quarta, B., & Anese, M. (2012). Furfurals removal from roasted coffee powder by vacuum treatment. *Food Chemistry*, 130(3), 610-614. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.07.083>
- Salas, T. (2026). *Evaluación de la inoculación de levaduras y tiempo de fermentación en café variedad Castillo, como técnica de mitigación de la formación de contaminantes neoformados durante el tostado* [Trabajo de pregrado, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]
- Schenker, S., & Rothgeb, T. (2017). The roast: Creating the beans' signature. In: Folmer, B. (Ed), *The craft and science of coffee* (pp. 245-271). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803520-7.00011-6>

- Schenker, S., Heinemann, C., Huber, M., Pompizzi, R., Perren, R., & Escher, R. (2002). Impact of roasting conditions on the formation of aroma compounds in coffee beans. *Journal of Food Science* 67(1), 60-66. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb11359.x>
- Schinella, G., Mosca, S., Cienfuegos-Jovellanos, E., Pasamar, M. A., Muguerza, B., Ramon, D., & Ríos, J. L. (2010). Antioxidant properties of polyphenol-rich cocoa products industrially processed. *Food Research International*, 43(6), 1614-1623. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.04.032>
- Schouten, M.A. Tappi, S., & Romani, S. (2020). Acrylamide in coffee: Formation and possible mitigation strategies - A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 60(22), 3807-3821. <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1708264>
- Silva da Costa, D., Gonçalves-Albuquerque, T., Soares-Costa, H., & Ariseto-Bragotto, A.P. (2023). Thermal contaminants in coffee induced by roasting: a review. *International Journal of Environmental research and public health*, 20(8), 5586. <https://doi.org/10.3390/ijerph20085586>
- Strocchi, G., Rubiolo, P., Cordero, Ch., Bichi, C., & Liberto, E. (2022). Acrylamide in coffee: What is known and what still needs to be explored. A review. *Food chemistry*, 393, 133406. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133406>
- Summa, C. A., de la Calle, B., Brohee, M., Stadler, R. H., & Anklam, E. (2007). Impact of the roasting degree of coffee on the in vitro radical scavenging capacity and content of acrylamide. *LWT - Food Science and Technology*, 40(10), 1849-1854. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.11.016>
- Tamrin, K., Harijono, Y., Estiasih, S. S., & Santoso, T. U. (2012). Effects of various vacuum and conventional roasting temperatures on color alteration and polyphenols content of cocoa powder. *Journal of Food Science and Engineering*, 2, 642-651. <https://doi.org/10.17265/2159-5828/2012.11.004>
- Timberlake, C. F. (1980). Anthocyanins: Occurrence, extraction and chemistry. *Food Chemistry*, 5(1), 69-80. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(80\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0308-8146(80)90065-5)
- Vallejo, F., Tomás-Barberán, F. A., & García-Viguera, C. (2003). Effect of climatic and sulphur fertilisation conditions, on phenolic compounds and vitamin C, in the inflorescences of eight broccoli cultivars. *European Food Research and Technology* 216(5), 395-401. <https://doi.org/10.1007/s00217-003-0664-9>
- Vieira-Porto, A. C., Cunha, S. C., Rosa, E. C., de Paula, J., Cruz, A. G., Freitas-Silva, O., Fernandes, J.O., & Farah, A. (2024). Chemical composition and sensory profiling of coffees treated with asparaginase to decrease acrylamide formation during roasting. *Food Research International*, 186, 114333. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114333>
- Xu, F. (2018). *Acrylamide mitigation in coffee by asparaginase application*. [Doctoral dissertation, University of Reading]. <https://doi.org/10.48683/1926.00084950>

- Zamora, R., & Hidalgo, F.J. (2008). Contribution of lipid oxidation products to acrylamide formation in model systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(15), 6075-6080. <https://doi.org/10.1021/jf073047d>
- Zanin, R., Corso, M., Kitzberger, C. S., Scholz, M. B., & Benassi, M. T. (2016). Good cup quality roasted coffees show wide variation in chlorogenic acids content. *LWT - Food Science and Technology*, 74, 480-483. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2016.08.012>
- Zapata-Bustamante, S., Tamayo-Tenorio, A., & Rojano, B. A. (2015). Efecto del tostado sobre los metabolitos secundarios y la actividad antioxidante de clones de cacao colombiano. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7497-7507. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v68n1.47836>
- Zzaman, W., & Sifat, S. A. (2023). Impact of superheated steam roasting on changes in antioxidant and microstructure properties of raw and processed cocoa cotyledon. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 30(2), 103562. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103562>
- Zzaman, W., Bhat, R., Yang, T. A., & Easa, A. M. (2017). Influences of superheated steam roasting on changes in sugar, amino acid and flavour active components of cocoa bean (*Theobroma cacao*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(13), 4429-4437. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8302>

Capítulo 6

Plan de acción y estrategias de fortalecimiento de la cadena de producción de café y cacao tostado

Action Plan and Strengthening Strategies for the Roasted Coffee and Cocoa Production Chain

Resumen

El fortalecimiento de las industrias tostadoras de café y cacao en el departamento del Huila requiere una intervención integral para alcanzar la sostenibilidad y la competitividad internacional. El diagnóstico identifica brechas críticas en cuatro áreas fundamentales: gestión empresarial, mercadeo, procesamiento y aspectos legales. En el ámbito administrativo, más del 60% de las empresas en ambos sectores carecen de una estructura organizacional definida y presentan debilidades en su componente teleológico (misión, visión y valores). Además, el uso de las TIC es limitado debido a la falta de capacitación, lo que desplaza las ventas digitales a un segundo plano frente a los métodos tradicionales. En cuanto al procesamiento, existe una falta de trazabilidad y de control de calidad. En el café, se desconoce frecuentemente el origen preciso de la materia prima, mientras que, en el cacao, técnicas de secado inadecuadas provocan la presencia de mohos en el 77% de los granos. El plan propone estrategias de mediano plazo como el desarrollo de software especializado para trazabilidad y la implementación de laboratorios de calidad con normas ISO. Finalmente, la informalidad legal es un obstáculo mayor; un alto porcentaje de tostadoras opera sin registro del INVIMA ni marcas registradas. Las estrategias a corto y mediano plazo se centran en alianzas institucionales para la formalización y la obtención de certificaciones internacionales (Fairtrade, Rainforest Alliance). Estas acciones escalonadas buscan transformar la producción artesanal en una industria tecnificada, legalmente sólida y con alto valor agregado en el mercado global.

Palabras clave: cadenas de valor, trazabilidad, competitividad, formalización empresarial, Huila.

Abstract

Strengthening the coffee and cocoa roasting industries in the Department of Huila requires a comprehensive intervention to achieve sustainability and international competitiveness. The diagnosis identifies critical gaps in four fundamental areas: business management, marketing, processing, and legal aspects. In the administrative sphere, over 60% of companies in both sectors lack a defined organizational structure and exhibit weaknesses in their teleological component (mission, vision, and values). Furthermore, the use of ICT (Information and Communication Technologies) is limited due to a lack of training, which relegates digital sales to the background in favor of traditional methods. Regarding processing, there is a notable lack of traceability and quality control. In the coffee sector, the precise origin of raw materials is frequently unknown, while in the cocoa sector, inadequate drying techniques lead to the presence of mold in 77% of the beans. The plan proposes medium-term strategies, such as the development of specialized traceability software and the implementation of quality laboratories following ISO standards. Finally, legal informality remains a major obstacle; a high percentage of roasters operate without INVIMA registration or registered trademarks. Short- and medium-term strategies focus on institutional alliances to promote formalization and the attainment of international certifications (Fairtrade, Rainforest Alliance). These phased actions aim to transform artisanal production into a technically advanced, legally sound industry with high added value in the global market.

Keywords: *value chains, traceability, competitiveness, business formalization, Huila.*

Introducción

En el departamento del Huila se presentan diferentes tipos de empresas. A nivel mundial se presenta una alta demanda por cafés de especialidad, donde los consumidores son más exigentes, que valoran la calidad del café, las experiencias únicas, son conscientes de la salud y la sostenibilidad (Miatton & Amado, 2023). Por su parte, se viene incrementando la demanda mundial de este producto en sus diferentes presentaciones y con las características organolépticas diferenciales y bajos contaminantes para la salud, lo que conlleva a que se generen diferentes tipos de emprendimiento en la región.

La generación de planes de acción permite a los tomadores de decisiones incluirlos en los planes de desarrollo municipal, departamental, nacional y empresarial para alcanzar la sostenibilidad de los diferentes eslabones de las cadenas productivas y de valor para ser competitivos en los diferentes mercados locales, nacionales e internacionales.

La planeación estratégica, es un aspecto importante en el crecimiento y sostenimiento a futuro de las empresas, ya que les permite coordinar las acciones que se deben realizar día a día para lograr los objetivos de mediano y largo plazo (Mora-Riapira, 2015).

La aplicación de los planes de acción contribuye en la sostenibilidad y se convierte en una prioridad para empresas, ya que ha aumentado la demanda de café sostenible de origen. Las marcas de café que incorporan prácticas sostenibles en los diferentes procesos de la cadena de valor se diferencian por las mejoras en sus estrategias de abastecimiento y suelen obtener una ventaja competitiva (Abebe & Awoke, 2025).

A partir del diagnóstico desarrollado en el capítulo 1, se identificaron las diferentes problemáticas y se generó una propuesta de plan de acción con sus estrategias de mejoramiento a corto plazo (<2 años), mediano plazo (entre 2 y 5 años) y largo plazo (>5 años), en beneficio de los productores y tostadores en el departamento y de los demás eslabones de la cadena.

Marco de política pública articulado al plan de acción

El presente plan de acción se articula con tres niveles de política pública. En el nivel nacional transversal, la Política Nacional de Desarrollo Productivo (CONPES 3866 de 2016) define el objetivo de desarrollar instrumentos que resuelvan fallas de mercado, de gobierno o de articulación a nivel de la unidad productora, de los factores de producción o del entorno competitivo, con el fin de aumentar la productividad y diversificar los productos de bienes y servicios; esta política, liderada por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinCIT) y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR), se implementa en un horizonte 2016-2025 y respalda directamente las estrategias de fortalecimiento de la estructura organizacional, el componente teleológico y la transformación digital propuestas en este capítulo.

Para la cadena cafetera, el Documento CONPES 4052 de 2021, “Política para la Sostenibilidad de la Caficultura Colombiana”, constituye la hoja de ruta de la acción pública para el sector a 2030. Esta política, a través de un trabajo en conjunto entre el Gobierno Nacional y la Federación Nacional de Cafeteros (FNC), propone un plan de acción centrado en cuatro ejes estratégicos desarrollados a través de once líneas de acción, con una inversión mínima proyectada de \$34.531 millones para un horizonte de nueve años. El diagnóstico que sustenta el CONPES 4052 identifica problemáticas convergentes con las descritas en

este capítulo: baja productividad por acceso limitado a activos productivos, barreras de mercado para la comercialización interna y externa del café verde y transformado, e insuficiente oferta de bienes públicos en los eslabones de la cadena, incluida la baja conectividad digital. Esta última coincide directamente con la brecha de uso de TIC y redes sociales identificada en la subcategoría de información empresarial. Asimismo, el antecedente CONPES 3763 de 2013, “Estrategia para la Competitividad de la Caficultura Colombiana”, ya señalaba la necesidad de optimizar la productividad analizando estructuras de costos por zona y tamaño de productor, e instalar centros digitales en municipios cafeteros para la conectividad.

Para la cadena cacaotera, el Acuerdo de Competitividad de la Cadena Cacao-Chocolate, suscrito por Fedecacao, el Gobierno nacional y la empresa privada con financiación de USAID, define cinco pilares de desarrollo de la cacaocultura nacional con visión a 2030: (1) Origen Colombia, (2) Apuesta a la productividad sostenible, (3) Investigar e innovar juntos, (4) Unidos por una extensión rural de impacto, y (5) Más capacidad para transformar. Este acuerdo, que actualiza el Acuerdo Nacional de Competitividad suscrito en 2001 y revisado en 2009, fijó como meta alcanzar en 2030 una producción de 126.000 toneladas de cacao, de las cuales se busca exportar cerca de 67.000 toneladas con valor agregado y no solo como materia prima. El Consejo Nacional Cacaotero definió cinco núcleos productivos prioritarios para las acciones de apoyo competitivo, entre los cuales se encuentra el núcleo Huila–Tolima, lo que confiere especial pertinencia a las estrategias de poscosecha, tostado y la formalización de propuestas en este capítulo para el departamento.

A nivel departamental

A nivel departamental, el estudio de Salamanca-Falla (2024), aplicó el modelo de competitividad sistémica de Esser *et al.* (1994; 1996) de niveles micro, meso, macro y meta, al sector cafetero del Huila, identificando que, pese a que el departamento se ha consolidado como una de las regiones más productivas de café en Colombia, sus índices de competitividad continúan siendo de los más bajos del país. El estudio, basado en la Agenda Integrada de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación del Huila (Gobernación del Huila y Cámara de Comercio de Neiva, 2015) en articulación con el CONPES 3866, evidenció brechas coincidentes con las identificadas en este capítulo: limitada transferencia tecnológica, bajo número de empresas certificadas en sistemas ISO, limitado acceso y uso de TIC, y baja formalidad empresarial. El autor concluye que la competitividad sistémica del sector depende en gran parte del nivel meso (donde se promueven las ventajas

competitivas), pero requiere de una articulación efectiva con el nivel meta, es decir, con la realidad sociocultural de las familias productoras, recomendación directamente aplicable a las estrategias de capacitación y acompañamiento que este capítulo propone para los pequeños tostadores artesanales.

Implicaciones para la investigación, la política pública y la sostenibilidad agroindustrial

El estudio de los contaminantes neoformados en las cadenas agroindustriales del café y el cacao ha adquirido creciente relevancia debido a sus implicaciones sobre la inocuidad alimentaria, la competitividad de los mercados y la sostenibilidad de los sistemas productivos. En este contexto, la presente obra aborda de manera integral la formación de compuestos como la acrilamida, el 5-hidroximetilfurfural (5-HMF), el furano y el alcohol furfurílico, desde una perspectiva que articula la caracterización empresarial, la evaluación de los procesos de transformación y el análisis de estrategias de mitigación aplicables a las condiciones productivas del departamento del Huila.

La estructura del libro permite comprender la formación de contaminantes neoformados como un fenómeno multifactorial que se origina a partir de la interacción entre variables agronómicas, microbiológicas, tecnológicas y de procesamiento. En particular, los procesos de fermentación, secado y tostado constituyen etapas críticas en las que las condiciones operativas pueden influir significativamente sobre la generación de estos compuestos. En consecuencia, el abordaje de esta problemática requiere una visión sistémica e interdisciplinaria que integre conocimientos provenientes de la ingeniería agroindustrial, la microbiología, la química de alimentos, la estadística aplicada, la gestión de la calidad, la economía y las ciencias sociales.

Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de fortalecer la investigación orientada a comprender los mecanismos de formación de contaminantes neoformados y las interacciones entre las variables de proceso. Aunque los análisis descriptivos y las herramientas multivariadas implementadas permitieron identificar patrones de comportamiento y variables críticas, persiste la necesidad de avanzar hacia modelos predictivos que permitan estimar la formación de estos compuestos bajo diferentes condiciones de procesamiento y evaluar la eficacia de estrategias de mitigación en escenarios reales de producción.

En este sentido, futuras investigaciones deberán incorporar diseños experimentales más robustos, metodologías de validación y análisis estadísticos

avanzados que faciliten la construcción de modelos de predicción y optimización. Asimismo, resulta pertinente ampliar el alcance de los estudios hacia la evaluación del efecto combinado de variables asociadas al origen de la materia prima, las condiciones ambientales, las prácticas de fermentación y los perfiles de tostión sobre la generación de contaminantes neoformados y la calidad sensorial del producto final.

Los hallazgos presentados en esta obra demuestran que la implementación de estrategias de mitigación desde las etapas iniciales de procesamiento constituye una alternativa viable para reducir la formación de contaminantes sin afectar negativamente las características sensoriales del café y el cacao. Particularmente, la aplicación de cultivos iniciadores durante la fermentación representa una oportunidad para optimizar los procesos biotecnológicos, mejorar la estabilidad de las transformaciones microbiológicas y contribuir a la obtención de productos más seguros y diferenciados.

La relevancia de estos resultados trasciende el ámbito científico y adquiere especial importancia en el contexto de las políticas públicas orientadas al fortalecimiento de la agroindustria (CONPES 4052) y de la seguridad alimentaria (CONPES 113). La Política Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional reconoce la calidad e inocuidad de los alimentos como un eje fundamental para garantizar el acceso de la población a productos seguros y aptos para el consumo humano (CONPES 113, 3076). En este marco, la reducción de contaminantes neoformados se convierte en una estrategia clave para la protección de la salud pública y el fortalecimiento de los sistemas agroalimentarios.

El CONPES 2756, orientado al fortalecimiento de la salud y la seguridad social en Colombia, reconoce la seguridad social como un servicio público de carácter obligatorio y plantea como desafío principal el mejoramiento de los indicadores de salud de la población. Para ello, propone consolidar una oferta integral de servicios preventivos y curativos, garantizar la transición hacia el Sistema General de Seguridad Social en Salud y fortalecer el proceso de descentralización. Este documento de política pública reconoce que la situación de salud en Colombia ha requerido un mejoramiento progresivo debido a la coexistencia de enfermedades crónicas y degenerativas, las cuales afectan con mayor severidad a las poblaciones más vulnerables. Asimismo, identifica limitaciones e inequidades en el acceso a los servicios de salud.

En este contexto, la divulgación de los resultados derivados del presente proyecto, financiado por el Sistema General de Regalías, constituye una contribución

relevante para la prevención y mitigación de riesgos asociados a la exposición a contaminantes neoformados presentes en el café y el cacao tostados, los cuales se han relacionado con efectos adversos para la salud, incluidos algunos tipos de cáncer y alteraciones del sistema nervioso central.

Entre los objetivos planteados por esta política y su relación con la investigación sobre contaminantes neoformados, se destacan el fortalecimiento del desarrollo científico y tecnológico orientado a mejorar la prevención, el diagnóstico y la atención en salud, así como la promoción de tecnologías apropiadas que contribuyan al mejoramiento de la calidad de los servicios de salud en todos los niveles de atención. De igual manera, los programas y metas asociados al CONPES 2756 promueven el acceso universal y equitativo a los servicios de salud preventivos y curativos mediante estrategias de promoción de la salud y prevención de la enfermedad. Asimismo, impulsan la investigación básica y aplicada a través de programas de ciencia y tecnología para la salud, con especial énfasis en el desarrollo de la biotecnología y en la articulación entre los sectores académico, productivo y asistencial.

En consecuencia, este libro representa un aporte significativo desde la academia al fortalecimiento de las políticas públicas de salud en Colombia, al generar evidencia científica que favorece la incorporación de tecnologías y estrategias orientadas a la prevención de enfermedades y a la protección de la salud pública.

De igual manera, la Política para la Sostenibilidad de la Caficultura Colombiana, establecida en el CONPES 4052, resalta la necesidad de impulsar la agregación de valor, facilitar el acceso a nuevos mercados y fortalecer las capacidades tecnológicas de los actores de la cadena productiva. Asimismo, el CONPES 3076 reconoce las cadenas productivas del sector agropecuario y considera al cacao como una materia prima estratégica para la industria nacional de la chocolatería, con proyección hacia la expansión del mercado interno y el incremento de las exportaciones. En este contexto, la generación de conocimiento sobre contaminantes neoformados contribuye al cumplimiento de estos lineamientos de política pública, al proporcionar herramientas para mejorar la calidad e inocuidad del café y el cacao tostados, fortaleciendo su competitividad y permitiendo responder a las crecientes exigencias de los mercados internacionales.

Los resultados obtenidos adquieren una relevancia particular en un contexto global caracterizado por la adopción de estándares cada vez más estrictos en materia de inocuidad alimentaria, trazabilidad y sostenibilidad. Organismos

internacionales y mercados de alto valor agregado, especialmente en Europa, han fortalecido sus requisitos regulatorios relacionados con la presencia de compuestos potencialmente nocivos en los alimentos, lo que representa un desafío significativo para las cadenas agroindustriales de países productores.

En consecuencia, la implementación de estrategias preventivas y de mitigación orientadas a controlar la formación de contaminantes neoformados puede convertirse en un factor diferenciador para las empresas tostadoras y transformadoras de café y cacao. La capacidad de demostrar el cumplimiento de criterios de inocuidad y calidad no solo favorece el acceso a mercados especializados, sino que también fortalece la competitividad y la resiliencia de las cadenas productivas.

Desde la perspectiva territorial, esta investigación aporta una línea base para comprender las dinámicas de las pequeñas y medianas empresas tostadoras del departamento del Huila, identificar variables críticas en la generación de contaminantes y orientar procesos de innovación tecnológica adaptados a las condiciones regionales. La articulación entre actores del sector productivo, la academia, los laboratorios especializados y las entidades gubernamentales resulta fundamental para promover procesos de transferencia de conocimiento que permitan transformar la evidencia científica en soluciones aplicables al contexto empresarial (CONPES 4052).

Asimismo, las estrategias de reindustrialización y fortalecimiento de la agroindustria impulsadas en Colombia reconocen la necesidad de fomentar la innovación, la agregación de valor y el desarrollo de capacidades tecnológicas en los territorios (CONPES 4129, 3076). En este escenario, el estudio de los contaminantes neoformados representa una oportunidad para promover procesos productivos más eficientes, sostenibles y competitivos, alineados con las demandas actuales de los consumidores y los mercados internacionales.

Finalmente, el carácter aplicado de esta obra y su enfoque territorial contribuyen a consolidar una agenda de investigación orientada a la sostenibilidad de las cadenas del café y del cacao (CONPES 3076). La integración de la inocuidad alimentaria, la innovación tecnológica y el desarrollo territorial permite avanzar hacia modelos agroindustriales que generen valor económico, promuevan el bienestar de los productores y garanticen la oferta de alimentos seguros y de alta calidad.

De esta manera, los resultados presentados constituyen un insumo estratégico para la toma de decisiones por parte de productores, empresas, entidades gubernamentales y centros de investigación, contribuyendo al fortalecimiento de la competitividad regional y a la consolidación de sistemas agroalimentarios más sostenibles y resilientes.

Plan de acción de las empresas tostadoras de café en el Huila

I. Categoría: Información empresarial

A. Subcategoría: uso de redes sociales

Problemática: las empresas tostadoras de café ubicadas en las distintas zonas del departamento del Huila predominan en el uso de algunas redes sociales para venta de sus productos, el 62% utiliza Instagram, Facebook el 59%, sitios web el 44%, y Twitter el 3%, este poco uso de las redes sociales es debido al conocimiento básico y falta de capacitación e innovación en el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC).

Estrategia a corto plazo: articulación con entidades públicas o privadas para el manejo de herramientas TIC y redes sociales.

Estrategia a mediano plazo: plan de marketing digital para promover el uso de las redes sociales para la visibilidad y venta de productos.

B. Subcategoría: estructura organizacional de la empresa

Problemática: el 63% de las tostadoras de café en el departamento no cuentan con una estructura organizacional, en cargos y funciones de la empresa. Existe falta de diseño e implementación de un sistema de gestión integrado de calidad.

Estrategia a corto plazo: realizar capacitaciones, acompañamiento y seguimiento a las empresas sobre su estructura, y organización (jerarquía, cargos y funciones del personal propio de la empresa y colaboradores) y la implementación de un sistema integrado de gestión de calidad.

Estrategia a mediano plazo: realizar el acompañamiento para la implementación de un sistema integrado de gestión de calidad.

Estrategia a largo plazo: desarrollar visitas con empresas certificadoras de sistemas de gestión de calidad.

C. Subcategoría: estructuración del componente teleológico

Problemática: en el departamento del Huila el 81% de las empresas tostadoras de café tienen constituido su componente teleológico en misión, visión, sin embargo, presenta deficiencia en la construcción de los objetivos (44%) y valores (9%).

Estrategia a corto plazo: realizar capacitaciones para la estructuración del componente teleológico, construcción de objetivos, valores, misión y visión empresarial, direccionando las empresas según sus propósitos.

Estrategia a mediano plazo: realizar el acompañamiento para la implementación de un sistema integrado de gestión de calidad.

Estrategia a largo plazo: desarrollar visitas con empresas certificadoras de sistemas de gestión de calidad.

II. Categoría: mercadeo**A. Subcategoría: estrategias de venta**

Problemática: en relación con las tostadoras de café, el 53% lleva a cabo estrategias de venta de los productos, un 34% realiza ventas por medio digital; el 28% tienen ventajas en el producto, llevan a cabo la publicidad de producto, un 25% realiza la distribución del producto, y el 12% condiciones del precio.

Estrategia a corto plazo: plan de marketing ampliado como estrategias de venta de productos.

Estrategia a mediano plazo: reuniones anuales para actualizarse sobre los nuevos medios y métodos de estrategias de venta a implementar.

Estrategia a largo plazo: participación en ferias nacionales e Internacionales de promoción de productos tostados (ProColombia).

III. Categoría: procesamiento del producto**A. Subcategoría: procedencia y origen de la materia prima**

Problemática: el origen de la materia prima de las empresas tostadoras de café proviene en un 72% de fincas de productores, el 41% materia prima propia, menos del 16% asociaciones de productores y trilladoras. La gran mayoría de las personas que realizan la compra de la materia prima desconocen el

origen y procedencia en relación con el nombre del municipio donde se cultiva, la vereda, finca, la extensión (ha) y la altitud.

Estrategia a mediano plazo: desarrollo de un software para la trazabilidad de la producción de café en las fincas de los productores, trilladoras y asociaciones, el cual presente los siguientes servicios:

1. Obtención de información a partir de imágenes.
2. Identificación del productor.
3. Información de las fincas (origen, departamento, municipio, lote del cultivo, nombre de las fincas).
4. Registro de todas las actividades propias del cultivo, costos por producción, ganancias y pérdidas.
5. Registro de variedades.
6. Clasificación de árboles en producción, improductivos, sanos, enfermos; Registro de enfermedades y plagas, infestación del cultivo.
7. Historial climático, altitud, extensión por hectárea, edad del cultivo.
8. Registro de cosecha, Registro de rendimiento por ha y calidad de la cereza.
9. Registro de labores del cultivo.
10. Registro de poscosecha (despulpado, fermentación, secado, lavado, trillado) .
11. Registro de riego.
12. Registro de productos usados (fungicidas, insecticidas, herbicidas, fertilizantes) y sus dosis, fechas de aplicación.
13. Datos sobre recomendaciones en el cultivo y sus procesos.

B. Subcategoría: proceso de poscosecha del café

Problemática: en las empresas tostadoras de café, tan solo el 75% de los integrantes conocen el proceso de poscosecha húmedo, el 62% conoce el proceso seco el cual es sometido al café, y el 31% de las tostadoras conocen el proceso semi seco.

Estrategia a corto plazo: divulgación de cartillas y transferencia de conocimiento que faciliten la interpretación y conocimiento acerca de los distintos procesos de poscosecha y beneficio del café.

Estrategia a corto plazo: articulación con servicios de asistencia técnica rural para la implementación de las buenas prácticas agrícolas en las fincas productoras de café.

Estrategia a mediano plazo: transferencia tecnológica, vinculación con entidades para la obtención de recursos económicos y maquinaria (tostadoras, despulpadoras, trilladoras, clasificadoras, selladoras, molinos, entre otras) que faciliten los procesos de poscosecha garantizando la calidad y potencializar los procesos.

Estrategia a mediano plazo: desarrollo de proyectos de investigación

C. Subcategoría: proceso de tostado

Problemática: en las empresas tostadoras de café, se obtuvo que tan solo el 88% de las empresas llevan a cabo el proceso de tostado del café (curvas) por medio del grado de tostado y menos del 84% por medio de temperaturas y tiempo.

Estrategia a corto plazo: capacitaciones y talleres formativos por medio de convenios y alianzas con entidades para mejorar las técnicas de tostado.

Estrategia a mediano plazo: generación de convenios con entidades públicas y privadas para el desarrollo de talleres, entrenamientos a tostadores y catadores; cursos en barismo, tostado de café, curvas de tosti3n, buenas prácticas para el tostado del café, análisis físico y sensorial, con su respectiva certificación para el personal.

D. Subcategoría: almacenamiento y controles

Problemática: el 71% de las empresas tostadoras de café llevan a cabo el almacenamiento en sacos de fique, un 31% en bolsas tipo Grain Pro, y el 9% en lonas, llevando a cabo el 38% un tiempo máximo de almacenamiento de 1 a 2 semanas, y un 25% de 1 a 2 meses, los cuales tienen en cuenta ciertos controles de almacenamiento. El 38% de las empresas realizan controles de humedad, el 34% control de temperatura y el 22% control de ventilación.

Estrategia a corto plazo: transferencia de tecnología para el adecuado almacenamiento como el uso de bolsas tipo Grain Pro para mantener la calidad del producto en condiciones de almacenamiento, control de tiempo, humedad y temperatura.

Estrategia a mediano plazo: desarrollo de proyectos de infraestructura para el almacenamiento de los sacos de café con el manejo de las condiciones óptimas de temperatura, humedad y ventilación.

E. Subcategoría: control de calidad

Problemática: en relación con los controles de calidad tan solo el 66% de las empresas lo realizan por medio de análisis físico, el 59% por medio de análisis sensorial, y un 47% realizan el control de humedad.

Estrategia a corto plazo: implementar un laboratorio de control de calidad articulado con un sistema integrado de gestión de calidad con el fin de optimizar los procesos de control del tostado disminuyendo contaminantes y mejorando la calidad organoléptica de los productos.

Estrategia a mediano plazo: implementar un software de gestión de calidad con el cual se establezca un correcto control en los procesos y se garantice la implementación y cumplimiento del sistema de gestión de calidad en el menor tiempo y costo.

Estrategia a mediano plazo: implementación de controles basados en Organización Internacional de Normalización (ISO) para la certificación de las empresas tostadoras.

IV. Categoría: aspectos legales**A. Subcategoría: aspectos legales de las empresas tostadoras de café**

Problemática: en relación con los aspectos legales algunas empresas no cuentan con registro INVIMA (29%), Buenas prácticas de Manufactura y Buenas prácticas Agrícolas (67,74%) para el funcionamiento y manipulación de productos alimenticios de la empresa y manipulación de productos alimenticios de la empresa. En relación con la comercialización a las empresas les falta marca registrada (35,48%), propiedad industrial (16,12%), SGSS (67,74%).

Estrategia a corto plazo: desarrollo de un proyecto para la implementación y cumplimiento de los requisitos para los registros en INVIMA, buenas prácticas de manufactura (empresas tostadoras) y buenas prácticas agrícolas (productores de café como materia prima).

Estrategia a corto plazo: desarrollo de un proyecto para el diseño y registro de la marca registrada, propiedad industrial, código de barras y SGSS en las respectivas entidades.

Estrategias a corto plazo: desarrollar alianzas con entidades públicas o privadas (Cámara y Comercio, Ministerio de Salud y Protección Social,

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo, la Superintendencia de Industria y Comercio, instituto colombiano agropecuario (ICA), entre otras) para la generación de capacitaciones para la obtención de registro INVIMA, Buenas Prácticas Agrícolas, Buenas Prácticas de Manufacturas y propiedad industrial.

Estrategia a mediano plazo: articulación con empresas certificadoras para la obtención de sellos de control de calidad (HACCP), certificaciones de sostenibilidad (Rainforest Alliance, Fairtrade (Comercio Justo)), sellos de Agricultura Orgánica y denominaciones de origen para la competitividad y apertura de nuevos mercados.

Articulación normativa: las estrategias de formalización se articulan con la Ley 811 de 2003, que crea las Organizaciones de Cadena en el sector agropecuario y da soporte legal a las alianzas con el Consejo Nacional Gremial Cafetero; al Decreto 3075 de 1997 y la Resolución INVIMA 2674 de 2013, que regulan las Buenas Prácticas de Manufactura para alimentos en Colombia; y a la Resolución ICA 30021 de 2017, marco normativo de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) aplicable a los productores de café como proveedores de materia prima. Estos resultados permiten a los tomadores de decisión identificar la ruta jurídica para el cierre de brechas de informalidad señaladas en el diagnóstico (29% sin registro INVIMA, 67,74% sin BPM/BPA).

Plan de acción de las empresas tostadoras de cacao en el Huila

I. Categoría información empresarial

A. Subcategoría: uso de redes sociales

Problemática: en las empresas tostadoras de cacao ubicadas en el departamento del Huila, predomina el uso de algunas redes sociales para la venta de sus productos Facebook en un 62%, seguido por Instagram 46% y sitios web 15%, este poco uso de las redes sociales se debe al conocimiento básico y a la falta de capacitación en el uso de las tecnologías y redes sociales.

Estrategia a corto plazo: plan de marketing digital para promover el uso de las redes sociales para la venta de productos.

Estrategia a corto plazo: vinculación con entidades públicas o privadas que fortalezcan la transferencia de conocimientos, y tecnología brindando la oportunidad de entrar en contacto con más productores, tostadores, regionales, nacionales e internacionales, como también con instituciones relacionadas a la producción y tostado del cacao en donde se obtendrán

recursos, adquisición de maquinarias, gestión de proyectos, entre otros beneficios.

B. Subcategoría: estructuración del componente teleológico

Problemática: en el departamento el 46% de las empresas tostadoras de cacao tienen constituido su componente teleológico en misión, visión; el 23% los objetivos y un 8% los valores. Por ende, se deben crear estrategias que permitan estructurar en totalidad el componente teleológico para gestionar de forma eficiente los planes a corto, mediano y largo plazo.

Estrategia a corto plazo: realizar capacitaciones anuales para la creación y mejora del componente teleológico, y su estructura en aquellas empresas de cacao que realizan el tostado de forma artesanal e industrial.

C. Subcategoría: estructura organizacional de la empresa

Problemática: el 70% de las empresas tostadoras de cacao en el departamento no cuentan con una estructura organizacional, definida en cargos y funciones de la empresa.

Estrategia a corto plazo: capacitar a las empresas tostadoras en relación con su estructura organizacional en donde se guiará a los colaboradores de la empresa la implementación de un organigrama en el que se representará la estructura jerárquica de la empresa, los cargos y funciones y las líneas oficiales de comunicación.

II. Categoría: mercadeo

A. Subcategoría: procedencia y origen de la materia prima

Problemática: el 69% de la materia prima que obtienen las empresas tostadoras es propia, un 54% se obtiene por medio de fincas de productores y el 15% por asociaciones de productores.

Estrategia a mediano plazo: desarrollo de un software para la trazabilidad de la producción de cacao en las fincas de los productores y asociaciones cacaoteras. Información de la finca, gestionar lote, registro de cosecha, registro de la clasificación, registro de la calidad, registro del desgranado, registro de fermentación, y registro de secado.

B. Subcategoría: estrategias de venta del producto

Problemática: el 85% de las empresas tostadoras cuentan con estrategias de ventas en los productos, 54% publicidad del producto, 38% ventajas del

producto, 31% distribución del producto, y condiciones de precio, y un 8% lleva a cabo las ventas digitales.

Estrategia a corto plazo: capacitaciones presenciales y virtuales con incubadoras de emprendimiento de universidades o entidades del sector donde se aborden temas de posicionamiento de productos en el mercado, desarrollo de un plan de marketing, estrategias de divulgación, fortalecimiento de habilidades de negociación y cambios en el mercado.

Estrategias a mediano plazo: estructuración y desarrollo de un proyecto de marketing para la formación de pymes (pequeñas y medianas empresas) para el diseño de estrategias de valor en los productos, diseño de piezas gráficas, divulgación por diferentes canales (redes sociales, televisión, radio, etc.).

III. Categoría: procesamiento del Producto

A. Subcategoría: proceso de poscosecha del cacao

Problemática: en los procesos de poscosecha relacionados a la fermentación, se encuentra que el 92% de las empresas se realiza en cajones de madera, y menos del 15% en baldes plásticos; el secado de los granos se realiza por el 77% al sol, y el 54% en paseras, el 23% en marquesinas. El 54% se almacena en lonas, el 46% sacos de fique. En estos procesos se ha evidenciado presencia de mohos en el 77% del secado de los granos, el 31% en la mazorca y menos del 23% en el almacenamiento.

Estrategia a corto plazo: formación virtual y presencial sobre el mejoramiento de los procesos de transformación del grano y procesos de poscosecha.

Estrategia a mediano plazo: desarrollo de proyectos en innovación para el prototipado con el fin de mejorar los procesos de fermentación y secado del grano.

Estrategia a mediano plazo: desarrollo de proyectos rurales para asistencia técnica y alianzas con entidades que apoyen a los cacaoteros a obtener certificaciones en las producciones y las empresas tostadoras.

Estrategia a largo plazo: transferencia tecnológica, vinculación con entidades para la obtención de recursos económicos y maquinarias (tostadoras, despulpadora, clasificadora, selladora, molino, fermentadores, secadores) que faciliten los procesos de poscosecha, garantizando la calidad y potencializando los procesos.

B. Subcategoría: proceso de tostado

Problemática: en las empresas tostadoras de cacao, el proceso de tostado es realizado en un 38% de forma artesanal mediante máquinas tostadoras, mientras que un 23% se realiza con hornos. Gran parte de las empresas tostadoras de cacao en el departamento del Huila realizan el proceso de tostado de cacao.

Estrategia a corto plazo: desarrollo de proyectos para formación de talento humano a través de capacitaciones, diplomados y talleres para la transferencia de mejores prácticas de tostado, catación de cacao, tiempos y temperaturas de tostado y recomendaciones para el tostado artesanal y el desarrollo de valor agregado a los productos tostados.

Estrategia a mediano plazo: estructuración de proyectos de innovación para el desarrollo de tecnologías y prototipos para el tostado del cacao.

Estrategia a mediano plazo: desarrollo de proyectos orientados a la creación de productos alimentarios con valor agregado a partir de productos tostados de cacao.

IV. Aspectos legales**A. Subcategoría: aspectos legales de las empresas tostadoras de cacao**

Problemática: en relación con los aspectos legales de formalidad empresarial el 30,77% no cuenta con registro en Cámara de Comercio y RUT. En relación con los aspectos legales para su operación las empresas no cuentan con registro INVIMA (53,85%), Buenas prácticas de manufactura (23,08%) y agrícolas (79,92%) para el funcionamiento y manipulación de productos alimenticios de la empresa. En relación con la comercialización a las empresas falta la marca registrada (69,23%) y SGSS (84,62%).

Estrategias a corto plazo: desarrollar alianzas con entidades públicas o privadas (Cámara y Comercio, Ministerio de Salud y Protección Social, Ministerio de Comercio Industria y Turismo, la Superintendencia de Industria y Comercio, Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), entre otras) para la generación de capacitaciones para la obtención de registro INVIMA, Buenas Prácticas Agrícolas, Buenas Prácticas de Manufacturas y propiedad industrial.

Estrategia a corto plazo: desarrollo de proyectos de articulación con la Cámara de Comercio del Huila para la formalización empresarial de pymes o emprendimientos de tostadores de cacao.

Estrategia a corto plazo: desarrollo de un proyecto para la implementación y cumplimiento de los requisitos para los registros en INVIMA, Buenas Prácticas de Manufactura (empresas tostadoras) y Buenas Prácticas Agrícolas (productores de cacao como materia prima).

Estrategia a mediano plazo: desarrollo de un proyecto para el diseño y registro de la marca registrada, propiedad industrial, código de barras y SGSS en las respectivas entidades.

Estrategia a largo plazo: articulación con empresas certificadoras para la obtención de sellos de control de calidad (HACCP), certificaciones de sostenibilidad (Rainforest Alliance, Fairtrade (Comercio Justo)), sellos de Agricultura Orgánica y denominaciones de origen para la competitividad y apertura de nuevos mercados.

Articulación normativa: la severidad de las brechas de formalidad en el sector cacaotero (30,77% sin registro en Cámara de Comercio y RUT; 53,85% sin INVIMA; 84,62% sin SGSS) se prioriza como caso crítico dentro del Acuerdo de Competitividad de la Cadena Cacao-Chocolate, particularmente en su pilar “Más Capacidad para Transformar”. Dado que el Consejo Nacional Cacaotero identificó el núcleo Huila-Tolima como zona prioritaria de intervención, las estrategias de formalización propuestas en este capítulo se articulan con los compromisos ya adquiridos por la institucionalidad nacional para esta región, lo que abre una ventana concreta de cofinanciación a través de Fedecacao y el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

Indicadores, metas, responsables y fuentes de financiación

Para la evaluación del plan de acción y seguimiento por parte de las entidades responsables en articulación con los formatos de Plan de Acción y Seguimiento (PAS) utilizados por el DNP para el CONPES 3866, se presentan a continuación los indicadores de resultado, las metas por horizonte temporal, los responsables institucionales sugeridos y las fuentes de financiación articuladas para cada categoría del diagnóstico. En la tabla 1 se presentan los indicadores para las empresas tostadoras de café y en la tabla 2 para las empresas tostadoras de cacao.

El mecanismo de verificación sugerido para el conjunto de indicadores es la actualización anual del diagnóstico empresarial mediante encuesta a la población tostadora registrada en la Cámara de Comercio de Neiva, en coordinación con la Secretaría de Agricultura y Minería del Huila y los respectivos comités de cadena, replicando la metodología de levantamiento de información utilizada en el diagnóstico base del capítulo 1.

Tabla 1. Indicadores, metas, responsable y fuentes de financiación para empresas tostadoras de café

Categoría	Indicador de resultado	Meta (línea base → meta)	Responsable	Fuente de financiación
Información empresarial – TIC y redes sociales	Porcentaje de empresas tostadoras con presencia activa en al menos dos canales digitales de venta	44% → 70% (mediano plazo)	Cámara de Comercio de Neiva; SENA (formación TIC); Secretaría de Agricultura y Minería del Huila	SENA (formación complementaria gratuita); iNNpulsa Colombia (convocatorias de fortalecimiento Mipyme y comercio electrónico); MinTIC (programas de transformación digital empresarial)
Información empresarial – Estructura organizacional	Porcentaje de empresas con organigrama, manual de funciones y SGC implementado	37% → 60% (corto plazo); 80% (mediano plazo)	Cámara de Comercio de Neiva; FNC (Comité Departamental de Cafeteros del Huila); consultores SGC certificados, USCO y UNAD	iNNpulsa Colombia (asistencia técnica gratuita en gestión empresarial); SENA (línea de emprendimiento y fortalecimiento empresarial); recursos propios cofinanciados; incubadoras de emprendimiento universitarias (USCO, UNAD)
Información empresarial – Componente teleológico	Porcentaje de empresas con misión, visión, objetivos y valores formalmente documentados	Objetivos 44% → 75%; valores 9% → 50% (corto-mediano plazo)	FNC; Comité Departamental de Cafeteros; gremios y asociaciones de tostadores, USCO y UNAD	SENA (capacitación gratuita en planeación estratégica); Programa de Transformación Productiva (iNNpulsa); incubadoras de emprendimiento universitarias (USCO, UNAD)
Mercadeo – Estrategias de venta	Porcentaje de empresas con plan de marketing documentado y canal de venta digital activo	Ventas digitales 34% → 60% (mediano plazo)	Procolombia; Cámara de Comercio de Neiva; Secretaría de Agricultura y Minería del Huila	Procolombia (programas de internacionalización y ferias); iNNpulsa Colombia (programas de comercio electrónico); FNC (Programa Origen Colombia)
Procesamiento – Trazabilidad de origen	Porcentaje de empresas que registran origen, finca, vereda y altitud de la materia prima en sistema digital	Software de trazabilidad implementado y operando en ≥ 50% de las tostadoras (mediano plazo)	FNC (Sistema de Información Cafetera – SICA); MinTIC; USCO, UNAD; Cooperativas de caficultores del Huila	Minciencias (convocatorias de CTEL agropecuaria); FNC – Fondo Nacional del Café; CONPES 4052 (línea de robustecimiento de sistemas de información); cooperación internacional (GIZ)
Procesamiento – Poscosecha y tostado	Porcentaje de personal capacitado y certificado en procesos de poscosecha, curvas de tostión y análisis sensorial	Cobertura del 100% del personal vinculado a empresas diagnosticadas (largo plazo)	SENA (formación titulada y complementaria); FNC (escuelas de campo); Comité Departamental de Cafeteros, USCO	SENA (formación gratuita); FINAGRO – Líneas Especiales de Crédito (LEC) para maquinaria y transferencia tecnológica; MADR (proyectos de extensión rural)
Procesamiento – Almacenamiento y control de calidad	Porcentaje de empresas con laboratorio de control de calidad articulado a SGC y % bajo certificación ISO	Laboratorio implementado en ≥ 1 nodo regional (corto plazo); certificación ISO en 30% de empresas (largo plazo)	ICONTEC; FNC; Gobernación del Huila (Secretaría de Agricultura y Minería)	MADR – Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales (red de laboratorios de análisis, CONPES 4052); Minciencias (proyectos de infraestructura científica); FINAGRO (ICR – Incentivo a la Capitalización Rural)
Aspectos legales – Formalización e INVIMA/BPM/BPA	Porcentaje de empresas con registro INVIMA vigente y cumplimiento de BPM/BPA	INVIMA: 71% → 90% (corto-mediano plazo); BPM/BPA: 32% → 70% (mediano plazo)	INVIMA; ICA; Cámara de Comercio de Neiva; Ministerio de Salud y Protección Social	iNNpulsa Colombia (acompañamiento a la formalización empresarial); ICA (asistencia técnica BPA sin costo); FINAGRO (FAG – Fondo Agropecuario de Garantías)
Aspectos legales – Propiedad industrial y certificaciones de sostenibilidad	Porcentaje de empresas con marca registrada y % con al menos un sello de sostenibilidad (HACCP, Fairtrade, Rainforest Alliance, Orgánico)	Marca registrada: 65% → 85% (mediano plazo); sellos de sostenibilidad: línea base no cuantificada → 25% de empresas (largo plazo)	Superintendencia de Industria y Comercio (SIC); FNC; entidades certificadoras (Rainforest Alliance, Fairtrade International)	Procolombia (ferias y promoción internacional); Fairtrade International y Rainforest Alliance (programas propios de acompañamiento); cooperación internacional (GIZ Colombia)

Tabla 2. Indicadores, metas, responsable y fuentes de financiación para empresas tostadoras de cacao

Categoría	Indicador de resultado	Meta (línea base → meta)	Responsable	Fuente de financiación
Información empresarial – TIC y redes sociales	Porcentaje de empresas tostadoras con presencia activa en al menos dos canales digitales de venta	15% (sitios web) → 40% (mediano plazo)	Cámara de Comercio de Neiva; SENA; Fedecacao (seccional Huila)	SENA (formación TIC gratuita); iNNpulsa Colombia (convocatorias Mipyme); MinTIC
Información empresarial – Estructura organizacional y componente teleológico	Porcentaje de empresas con organigrama formalizado y componente teleológico completo (misión, visión, objetivos, valores)	Estructura organizacional: 30% → 55% (corto plazo); componente teleológico completo: valores 8% → 40% (mediano plazo)	Fedecacao; Cámara de Comercio de Neiva; Comité Departamental Cacaotero del Huila, USCO y UNAD	SENA (capacitación gratuita); iNNpulsa Colombia (asistencia técnica); incubadoras de emprendimiento universitarias (USCO, UNAD)
Mercadeo – Procedencia y trazabilidad	Porcentaje de empresas con software de trazabilidad de finca a taza implementado	Software operando en ≥ 40% de las tostadoras vinculadas a asociaciones (mediano plazo)	Fedecacao; USCO, UNAD; Red Cacaotera (Huila–Caquetá); MADR	Minciencias (CTel agropecuaria); cooperación internacional (USAID – Programa de Alianzas Comerciales, FAO); MADR – recursos de Acuerdo de Competitividad Cacao-Chocolate
Mercadeo – Estrategias de venta	Porcentaje de empresas con plan de marketing estructurado y % con ventas por canal digital	Ventas digitales: 8% → 30% (mediano plazo)	Fedecacao; incubadoras de emprendimiento (USCO, UNAD); Cámara de Comercio de Neiva	iNNpulsa Colombia (programas de comercio electrónico y diagnóstico empresarial gratuito); Procolombia (ferias internacionales)
Procesamiento – Poscosecha (fermentación y secado)	Porcentaje de lotes con presencia de mohos en grano seco; % de empresas que implementan secadores tecnificados (marquesinas)	Mohos en secado: 77% → 40% (mediano plazo); marquesinas: 23% → 50% (largo plazo)	Fedecacao; USCO, UNAD, ICA; productores asociados (núcleo Huila–Tolima)	FINAGRO (LEC – maquinaria de poscosecha: despulpadoras, fermentadores, secadores); MADR (proyectos de infraestructura rural); Acuerdo de Competitividad Cacao-Chocolate (pilar Apuesta a la productividad sostenible)
Procesamiento – Tostado y valor agregado	Porcentaje de empresas con proceso de tostado tecnificado (curvas tiempo/temperatura) y certificación de catadores	Tostado tecnificado: 23% (hornos) → 45% (mediano plazo); catadores certificados: línea base no cuantificada → 20 catadores certificados en el departamento (largo plazo)	Fedecacao; SENA; Comité Departamental Cacaotero; USCO	SENA (formación titulada en cacao y chocolatería); Minciencias (proyectos de innovación y prototipado, pilar Investigar e innovar juntos)
Aspectos legales – Formalización e INVIMA/BPM/BPA	Porcentaje de empresas con registro en Cámara de Comercio/RUT y con registro INVIMA vigente	Cámara de Comercio/RUT: 69,23% → 90% (corto plazo); INVIMA: 46,15% → 75% (mediano plazo)	Cámara de Comercio de Neiva; INVIMA; ICA; Ministerio de Salud y Protección Social	iNNpulsa Colombia (formalización empresarial); ICA (asistencia técnica BPA); FINAGRO (FAG)
Aspectos legales – Propiedad industrial y certificaciones de sostenibilidad	Porcentaje de empresas con marca registrada y % con sello de sostenibilidad o certificación de calidad (HACCP, Fairtrade, Rainforest Alliance, Orgánico)	Marca registrada: 30,77% → 60% (mediano plazo); sellos de sostenibilidad: línea base no cuantificada → 20% de empresas (largo plazo)	SIC; Fedecacao; entidades certificadoras (Rainforest Alliance, Fairtrade International)	Procolombia (ferias y denominación de origen); Fairtrade International y Rainforest Alliance (programas propios); Acuerdo de Competitividad Cacao-Chocolate (pilar Origen Colombia)

Consideraciones finales

Para el fortalecimiento de las empresas tostadoras de café y cacao en el Huila se recomienda un desarrollo oportuno de las siguientes acciones:

1. **Formalización y cumplimiento legal:** para la competitividad de los productos en mercados internacionales, es importante la legalización de las empresas en la respectiva Cámara de Comercio y la DIAN. Se requiere el cierre de brechas de informalidad mediante la obtención de registros INVIMA, la protección de la propiedad industrial (marcas registradas) y el cumplimiento de las Buenas Prácticas de Manufactura (BPM).
2. **Profesionalización de la gestión empresarial:** se requiere una transformación de un modelo artesanal hacia una estructura organizacional técnica, para lo cual se debe trabajar en el componente teleológico (misión, visión, objetivos y valores) para dar dirección estratégica; asimismo, implementar organigramas que delimiten funciones y cargos, permitiendo una operación más eficiente y escalable.
3. **Transformación digital y marketing estratégico:** el uso de las TIC y redes sociales debe surtir un cambio desde lo tradicional hacia un enfoque profesional. La implementación de planes de marketing digital y la transición de ventas tradicionales a canales de comercio electrónico son pasos esenciales para visibilizar la calidad del producto huilense y conectar directamente con el consumidor final.
4. **Innovación técnica y trazabilidad:** el futuro de ambos sectores reside en la capacidad de garantizar el origen y la calidad técnica del producto. Las estrategias clave incluyen:
 - *Adopción tecnológica:* uso de software especializado para la trazabilidad “de la finca a la taza”, controlando variables climáticas, de cosecha y poscosecha.
 - *Estandarización del tostado:* migrar hacia el uso de curvas de tostión precisas (tiempo/temperatura) para asegurar la consistencia sensorial del producto.
5. **Calidad certificada y apertura de mercados:** a largo plazo, con las estrategias se espera la obtención de sellos de sostenibilidad y calidad (HACCP, ISO,

Fairtrade, Orgánico). Estas certificaciones, sumadas a la participación en ferias internacionales (como las promovidas por Procolombia), permitirán que el café y el cacao del Huila no solo compitan por volumen, sino por una diferenciación basada en la excelencia y la responsabilidad social.

Articulación con la política pública

Las estrategias de corto plazo propuestas (formalización, capacitación, componente teleológico) encuentran respaldo institucional inmediato en el CONPES 3866 y en los lineamientos del nivel meso identificados por Salamanca-Falla (2024) para el Huila, en particular, la Comisión Regional de Competitividad e Innovación (CRCI) del departamento como canal de articulación con el Gobierno Nacional. Las estrategias de mediano plazo (trazabilidad, laboratorios de calidad, certificaciones ISO) se alinean con la línea de robustecimiento de sistemas de información y el fortalecimiento de la red de laboratorios de análisis de contaminantes contemplados en el CONPES 4052. Las estrategias de largo plazo (sellos de sostenibilidad, apertura de mercados internacionales) son coherentes con el pilar “Origen Colombia” del Acuerdo de Competitividad Cacao-Chocolate y con la promoción del café tostado en origen como mecanismo de valor agregado prevista en el CONPES 4052. Esta triple articulación (nacional transversal, sectorial y departamental) dota al plan de acción de mayor viabilidad institucional y facilita su inclusión en los instrumentos de planeación del Plan de Desarrollo Departamental del Huila y en las agendas de los Consejos de Cadena respectivos.

Referencias

- Abebe, G., & Awoke, A. (2025). Sustainable ecosystem services in the coffee value chain. *Discover Sustainability*, 6, 1258. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02128-2>
- Consejo Nacional de Política Económica Social, & Departamento Nacional de Planeación. (2008). *Documento CONPES 113: Política nacional de seguridad alimentaria y nutricional (PSAN)*. https://www.icbf.gov.co/sites/default/files/conpes_113_de_2008.pdf
- Consejo Nacional de Política Económica Social, & Departamento Nacional de Planeación. (2000). *Documento CONPES 3076: Programa de oferta agropecuaria – PROAGRO*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3076.pdf>
- Consejo Nacional de Política Económica Social, & Departamento Nacional de Planeación. (2023). *Documento CONPES 4129: Política nacional de reindustrialización*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4129.pdf>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social, & Departamento Nacional de Planeación. (2021). *Documento CONPES 4052: Política para la sostenibilidad de la caficultura colombiana*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/4052.pdf>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social, & Departamento Nacional de Planeación. (2013). *Documento CONPES 3763: Una estrategia para la competitividad de la caficultura colombiana*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3763.pdf>
- Consejo Nacional de Política Económica y Social, & Departamento Nacional de Planeación. (1995). *Documento CONPES 2756: Salud y seguridad social*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/2756.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2016). *Documento CONPES 3866: Política nacional de desarrollo productivo*. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3866.pdf>
- Esser, K., Hillebrand, W., Messner, D., & Meyer-Stamer, J. (1994). *Competitividad sistémica: Competitividad internacional de las empresas y políticas requeridas*. Instituto Alemán de Desarrollo.
- Esser, K., Hillebrand, W., Messner, D., & Meyer-Stamer, J. (1996). Competitividad sistémica: Nuevo desafío para las empresas y la política. *Revista de La CEPAL*, 59, 39-52. <https://hdl.handle.net/11362/12025>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, Sociedad de Agricultores de Colombia. La cadena cacao-chocolate. Nuevo acuerdo por la competitividad. *Revista Nacional de Agricultura Edición 1026*. Junio 2022. <https://sac.org.co/la-cadena-cacao-chocolate-nuevo-acuerdo-por-la-competitividad/>

- Gobernación del Departamento del Huila, & Cámara de Comercio de Neiva. (2015). *Agenda integrada de competitividad, ciencia, tecnología e innovación del departamento del Huila*. <https://www.cchuila.org/wp-content/uploads/Agenda-Competitividad-del-Huila.pdf>
- Miatton, F., & Amado, L. (2023). Coffee as a service: Embedding efficiency and sustainability in coffee roasters. *Conferencia Internacional IEEE 2023 sobre Gestión, Operaciones y Decisiones Tecnológicas (ICTMOD)*. <https://doi.org/10.1109/ICTMOD59086.2023.10438126>
- Mora-Riapira, E. H., Vera-Colina, M. A., & Melgarejo-Molina, Z. A. (2015). Planificación estratégica y niveles de competitividad de las Mipymes del sector comercio en Bogotá. *Estudios Gerenciales*, 31, 79-87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.estger.2014.08.001>
- Salamanca-Falla, C. H. (2024). Screening de políticas públicas en la industria cafetera en Colombia: Una revisión desde la competitividad sistémica. *Revista CEA*, 10(24), e3039. <https://doi.org/10.22430/24223182.3039>



Gobernación
del **Huila**

